

Direction des bibliothèques

AVIS

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Effets d'un entraînement combiné en force et en endurance
sur la performance en course à pied

Par

Jean Nicolas Leduc Berryman

Département de Kinésiologie

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de M.Sc.
en Sciences de l'Activité Physique

Avril 2008

© J-Nicolas L-Berryman, 2008



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

**Effets d'un entraînement combiné en force et en endurance
sur la performance en course à pied**

**Présenté par :
Jean Nicolas Leduc Berryman**

.....
A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Olivier Birot

.....
Président-rapporteur

Laurent Bosquet

.....
Directeur de recherche

Grégory Dupont

.....
Membre du jury

Résumé

Les principaux déterminants de la performance en course à pied sont bien établis. La consommation maximale d'oxygène, l'endurance et le coût énergétique sont des qualités très importantes pour un coureur. Il apparaît que l'ajout d'un entraînement en force diminue le coût énergétique. Les entraînements de la force qui amènent des adaptations centrales (système nerveux central) semblent celles qui sont les plus efficaces à cet égard. Les entraînements dynamiques et la pliométrie sont reconnus pour induire des adaptations centrales sans hypertrophie. L'objectif de cette étude est de vérifier les effets de ces deux méthodes afin de déterminer laquelle a le plus grand impact sur le coût énergétique et la performance.

Vingt-trois coureurs amateurs (29.9 ± 7.4 ans, $VO_2 \text{ max} = 57.5 \pm 6.5 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) sont inclus dans cette étude pour ensuite être séparés en deux groupes : pliométrie (P) et efforts dynamiques (D). Les sujets doivent participer à un protocole d'entraînement de huit semaines pendant lesquelles trois entraînements de la capacité aérobie sont prescrits en plus d'un entraînement en force.

Les résultats démontrent qu'à la suite de l'entraînement, les deux groupes ont amélioré de façon significative (D -30 secondes ($SD=29$), P -36 secondes ($SD=25$), $p<0.01$) la performance au test de 3000 mètres. Le seul facteur de performance qui a été amélioré est le coût énergétique (D + 4%, P +7%, $p<0.01$). Les coureurs du groupe P ont par ailleurs profité davantage de ce type d'entraînement ($p<0.05$). La puissance des membres inférieurs a augmenté pour les deux groupes de sujets (D = 1147.2 Watts ($SD=179.8$) à 1324.3Watts ($SD=181.5$), P= 1173.6 Watts ($SD=139$) à 1214.6 Watts ($SD=190.4$)) mais un avantage est noté pour les sujets du groupe D ($p<0.05$). La hauteur atteinte à la suite d'un saut en contre mouvement a également été améliorée pour les deux groupes (D= + 1.5 cm ($SD=2.8$), P= + 2 cm ($SD=1.5$), $p<0.01$).

L'ensemble de ces résultats démontre que l'entraînement en force explosive permet d'améliorer le coût énergétique et la performance en course à pied. Il semble que la pliométrie soit plus avantageuse à cet égard.

Mots clés : capacité aérobie, coût énergétique, pliométrie, efforts dynamiques, qualités neuromusculaires.

Abstract

Performance in distance and middle distance running is mainly determined by three factors: maximal oxygen uptake, endurance and running economy. It seems that resistance training is a good stimulus to improve running economy and, therefore, performance in middle and long distance events. Resistance training is effective to improve running performance when central adaptations (central nervous system) occur in opposition to peripheral adaptations (muscle hypertrophy). Two methods, pliometrics and dynamic training, are known to generate adaptations at the central nervous system without any effect on muscle size. The purpose of this study is to compare the effects of these two methods on running economy and ultimately running performance.

Twenty-three amateur runners were included in this study (29.9 ± 7.4 years old, $\text{VO}_2 \text{ max} = 57.5 \pm 6.5 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) and they were divided in two groups: pliometrics (P) and dynamic (D) training. These runners were involved in an eight week training protocol during which three aerobic and one strength training sessions were prescribed each week.

Results show that after training, both groups improved performance in a 3000 meters event (D -30 seconds ($\text{SD}=29$), P -36 seconds ($\text{SD}=25$), $p<0.01$). The only modified performance factor for both group is running economy (D + 4%, P +7%, $p<0.01$). A statistical interaction ($p<0.05$) shows that the P group had the best improvements in terms of running economy. Both groups had significant improvements in power (D = 1147.2 Watts ($\text{SD}=179.8$) to 1324.3Watts ($\text{SD}=181.5$), P= 1173.6 Watts ($\text{SD}=139$) to 1214.6 Watts ($\text{SD}=190.4$)). Power gains were higher for subjects in the D group ($p<0.05$). Height reached after a counter movement jump was also improved for both groups after training (D= + 1.5 cm ($\text{SD}=2.8$), P= + 2 cm ($\text{SD}=1.5$)).

These results indicate that explosive strength training is a good method to improve running economy and running performance. It seems that pliometrics are more advantageous than dynamic training.

Key words: aerobic capacity, running economy, pliometrics, dynamic training, neuromuscular factors.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Entraînement et résultats, Helgerud.

Tableau 2 : CE et performance en course à pied.

Tableau 3 : Protocole d'entraînement, étude de Franch.

Tableau 4 : Corrélations entre la raideur musculaire et le CE.

Tableau 5 : Entraînement aérobic.

Tableau 6 : Entraînement de la force.

Tableau 7 : Caractéristiques anthropométriques des sujets.

Tableau 8 : VO_2Pic et indice d'endurance.

Tableau 9 : Qualités neuromusculaires.

Liste des figures

Figure 1 : Distribution des 20 meilleures performances au monde (hommes, 800 mètres – marathon) selon le continent en date de 1986.

Figure 2 : Distribution des 20 meilleures performances au monde (hommes, 800 mètres – marathon) selon le continent en date de 2003.

Figure 3 : Continuum des intensités d'entraînement de la puissance aérobie maximale (PAM) et locations des adaptations induites.

Figure 4 : Endurance et performance.

Figure 5 : Coût énergétique et vitesse de course.

Figure 6 : Déterminants du coût énergétique.

Figure 7 : Continuum des intensités d'entraînement de la force et locations des adaptations induites.

Figure 8 : Variations du CE.

Figure 9 : Variations de performance sur 3000m.

Figure 10 : Niveau initial du CE et variations post entraînement.

Liste des sigles et abréviations

Adénosine diphosphate (ADP)	Litre (L)
Adénosine triphosphate (ATP)	Masse (M)
American College of Sports Medicine (ACSM)	Maximum (max)
Centimètre (cm)	Mètres (m)
Consommation maximale d'oxygène (VO_2 max)	Millilitre (ml)
Coût énergétique en course à pied (CE)	Millimole (mmol)
Débit cardiaque (Qc)	Minute (min)
Degré ($^\circ$)	Newton (N)
Différence artério-veineuse ($\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2$)	Nombre (n)
Endurance (E)	Oxygène (O_2)
Force maximale (FM)	Performance en course à pied (Pcrs)
Fréquence cardiaque maximale (FCmax)	Pic de consommation d'oxygène (VO_2 Pic)
Gravité (g)	Puissance aérobie maximale (PAM)
Hauteur (H)	Raideur (K)
Hertz (Hz)	Seconde (sec)
Heure (h)	Temps de contact (TC)
Kilogramme (kg)	Temps de vol (TV)
Kilomètre (km)	Vitesse aérobie maximale (VAM)

Remerciements

Remercier : *Exprimer sa gratitude à quelqu'un pour quelque chose* (Petit Larousse, 2005)

C'est par cette page de remerciements que se termine la rédaction de ce mémoire. Curieusement, durant tout ce processus, je n'ai jamais vécu le syndrome de la page blanche. Me voilà à la partie qui semble la plus facile à écrire, coincé en ne sachant pas par où commencer. Peut-être que les mots ne sont pas suffisants pour exprimer ma gratitude.

Laurent Bosquet. Ce fût un grand honneur de travailler sous sa direction. Bien sûr que les apprentissages académiques sont à la base du lien entre un professeur et son étudiant. Par contre, j'ai également pu apprendre sur le plan humain au travers de cette relation. Le calme, la patience et la très grande disponibilité de Laurent ont contribué à faire de ces 7 derniers trimestres une période de ma vie grandement enrichissante. Merci.

François Péronnet. On a tous connu un professeur ayant eu une grande influence dans nos vies. J'ai eu la chance d'être étudiant dans un cours de M.Péronnet. Quelle belle leçon. Le cours parfait. Les connaissances et le savoir, le sens critique, un peu d'humour, un communicateur hors pair employant des stratégies d'enseignement à faire rêver bien des collègues aux Sciences de l'Éducation. Merci.

Delphine Maurel, Jérôme Blais, Kenan Gouadec, Ophélie Lheureux et Mathieu Larrousturou. Ces collègues m'ont tous donné, à un moment ou l'autre, un précieux coup de main afin de superviser les nombreux tests et entraînements prévus au protocole. Merci pour votre professionnalisme et vos sourires lors des moments plus difficiles.

Arthur Long et tous les employés de la Clinique de Kinésiologie du CEPsum. Merci de m'avoir accompagné et guidé durant toutes ces heures passées au laboratoire. Votre soutien était essentiel au bon déroulement de ce projet.

Monique et Michael. C'est un véritable honneur de pouvoir inscrire les noms de notre famille sur ce mémoire. MERCI.

Mylène et Thomas. MERCI.

Les mots ne sont pas suffisants pour exprimer ma gratitude.

Table des matières

Page titre	i
Identification du jury	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des sigles et abréviations	vii
Remerciements	viii
Table des matières	ix
1 – Recension des écrits	1
1.1 – Introduction	1
1.2 – Facteur de la performance en course à pied : la capacité aérobie	2
1.2.1 – VO_2 Max	3
1.2.2 – Endurance	8
1.2.3 – Coût énergétique	13
1.3 – Coût énergétique : facteurs déterminants et interventions	15
1.3.1 – Entraînement aérobie	15
1.3.2 – Force et entraînement combiné	16
1.3.2.1 – Entraînement en force : adaptations centrales et périphériques	18
1.3.2.2 – Méthodes privilégiées : Efforts dynamiques et pliométrie	19
1.3.3 – Biomécanique : la cinétique	21
1.3.3.1 – Raideur musculotendineuse	21
1.3.3.2 – Forces de réaction de sol	22
1.4 – Objectifs	23
1.5 – Hypothèses	23
2 – Expérimentations	24
2.1 – Méthodes	24

2.1.1 – Protocole	24
2.1.2 – Entraînement	24
2.1.2.1 – Entraînement de l'aptitude aérobie	24
2.1.2.2 – Entraînement de la force	25
2.1.3 – Déroulement des tests	26
2.1.3.1 – Test incrémenté	26
2.1.3.2 – Test de puissance des membres inférieurs	26
2.1.3.3 – Test de vitesse maximale	27
2.1.3.4 – Tests de sauts	27
2.1.3.5 – Test de performance	27
2.1.4 – Matériel et mesures	27
2.1.4.1 – Paramètres ventilatoires	27
2.1.4.2 – Puissance	28
2.1.4.3 – Vitesse	28
2.1.4.4 – Sauts	28
2.1.5 – Description des sujets	28
2.1.5.1 – Critères d'inclusion	28
2.1.5.2 – Critères de non-inclusion	28
2.1.6 – Méthode d'analyse des paramètres mesurés	28
2.1.6.1 – Test incrémenté	28
2.1.6.2 – Test de puissance des membres inférieurs	29
2.1.6.3 – Test de vitesse maximale	29
2.1.6.4 – Test de sauts	29
2.1.6.5 – Test de performance	29
2.1.7 – Analyse statistique	29
2.2 – Résultats	31
2.2.1 – Sujets	31

2.2.2 – Capacité Aérobie	31
2.2.3 – Qualités neuromusculaires.....	32
2.2.4 – Performance	33
2.2.5 – Corrélations	34
2.3 – Discussion	35
2.3.1 – Capacité aérobie.....	35
2.3.1.1 – VO_2max et endurance.....	35
2.3.1.2 – Coût énergétique et performance.....	36
2.3.2 – Qualités neuromusculaires.....	38
2.3.2.1 – Puissance	38
2.3.2.2 – Sprints.....	39
2.3.3.3 – Sauts en contre mouvement	39
2.3.3.4 – Raideur.....	40
2.4 – Conclusion et Applications pratiques	42
Bibliographie.....	43

1 – Recension des écrits

1.1 – Introduction

L'origine des athlètes offrant les meilleures performances au monde en course à pied a beaucoup changé depuis les vingt dernières années. Alors que les européens dominaient la scène en 1986, ils ont maintenant cédé les devants aux africains et plus précisément aux coureurs originaires du Kenya. Les figures 1 et 2 permettent de constater l'évolution de ce phénomène[1]. Les vingt meilleures performances dans chacune des épreuves (du 800 mètres(m) au marathon) sont comparées dans le temps en fonction de l'origine des coureurs.

Figure 1 - Distribution des 20 meilleures performances au monde (hommes, 800m - marathon) selon le continent en date de 1986

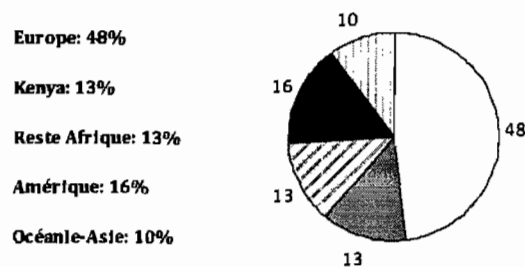
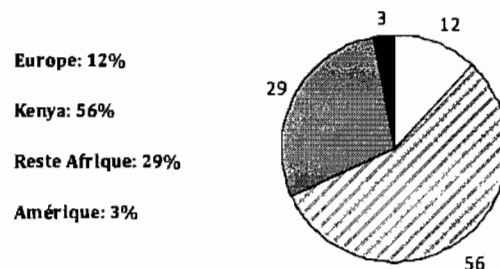


Figure 2 - Distribution des 20 meilleures performances au monde (hommes, 800m - marathon) selon le continent en date de 2003



D'après les données présentées par Larsen, Comparative Biochemistry and Physiology Part A (2003)

Foster[2] propose que cet avantage marqué en faveur des coureurs de l'est de l'Afrique peut être relié à un faible coût énergétique. Ces athlètes semblent en effet être très économes par rapport aux normes établies par l'*American College of Sports Medicine* (ACSM) et par rapport aux coureurs européens. Il est certain qu'entraîneurs et athlètes tenteront d'égaliser et de dépasser les succès obtenus par les Africains ces vingt dernières années. Devant cette hypothèse posée par Foster, il devient très intéressant de définir le coût énergétique en course à pied (CE) de même que d'établir les facteurs qui le déterminent. Une autre question importante se pose à savoir quelles sont les méthodes d'entraînement qui permettent les meilleures améliorations de cette composante. C'est à ces questions que cet ouvrage tentera de répondre. D'abord, il est important de considérer l'ensemble des facteurs de performance en course à pied.

1.2 – Facteur de la performance en course à pied : la capacité aérobie

Les travaux publiés par Di Prampero en 1986[3] démontrent que la performance en course à pied est principalement déterminée par trois facteurs : la consommation maximale d'oxygène ($VO_2 \text{ Max}$), l'endurance (E) et le coût énergétique (CE). En effet, ces trois composantes expliquent 72% de la variabilité des performances de trente-six coureurs amateurs qui ont participé, en 1983, au marathon international de Genève. Il est intéressant de noter que lorsque seul la $VO_2 \text{ Max}$ est considérée, 50% de la variabilité est expliquée. En ajoutant l'un des deux autres facteurs, on augmente ce pourcentage de 10%. L'équation proposée par les auteurs pour représenter ces constatations est la suivante :

$$\text{Performance en course à pied (Pcrs)} = E * VO_2 \text{ Max} / CE$$

Équation 1 – Facteurs de performance en course à pied

Il est donc possible de conclure à partir de cette formule qu'une augmentation de E ou de la $VO_2 \text{ Max}$ et/ou une diminution de CE devraient permettre à l'individu d'améliorer sa performance en course.

Il est cependant important de noter que lorsque le niveau des coureurs est homogène, surtout en ce qui concerne la $VO_2 \text{ Max}$, d'autres facteurs peuvent intervenir. D'ailleurs, les résultats de Di Prampero n'expliquent que 72% de la variabilité entre les performances. Certains auteurs [4, 5] proposent que la capacité anaérobie devient importante dans la mesure où celle-ci est mise en cause lors de certaines phases précises de la course (collines à monter, sprint final, etc.).

1.2.1 – VO₂ Max

Définition

Pour définir la VO₂ Max, Midgley [6] et Bassett [7] font encore référence aux premiers travaux effectués sur la question par Hill [8] dans les années 1920.

La VO₂ Max est la capacité maximale de transport et d'utilisation de l'oxygène, à partir de l'air ambiant jusqu'à la cellule, afin de contribuer à la respiration cellulaire durant une activité physique intense.

En mesurant la consommation maximale d'oxygène, il est possible d'évaluer la puissance maximale de resynthèse aérobie de l'adénosine triphosphate (ATP) [9]. Ce composé chimique est la seule source d'énergie pouvant être immédiatement convertie en énergie mécanique et c'est grâce à sa resynthèse que l'exercice physique peut être maintenu au-delà de quelques secondes. Lorsque les substrats énergétiques (lipides et glucides) sont oxydés, il en résulte une certaine quantité de gaz carbonique, d'eau et d'énergie [9]. Cette énergie est ensuite impliquée dans une réaction de phosphorylation permettant de synthétiser l'ATP. Plus le processus d'oxydation des substrats est intense, plus la synthèse de l'ATP est élevée [9].

Processus d'oxydation : Substrats + **oxygène** → gaz carbonique + eau + énergie

Processus de phosphorylation : Adénosine diphosphate (ADP) + Phosphate (P) → ATP

Équation 2 – Processus de phosphorylation oxydative [9]

Évaluation

La relation étroite entre la VO₂ Max et la performance en sports explique l'intérêt porté envers l'évaluation de cette composante. Le protocole classique, dit triangulaire, consiste à faire réaliser au sujet un exercice dont la puissance augmente de façon linéaire jusqu'à épuisement par paliers d'une durée d'une à quatre minutes [9]. En course à pied, la vitesse croît de 1 à 2 kilomètres.heure⁻¹ (km.h⁻¹) à chaque palier. L'objectif est d'amener le sujet à un plateau dans sa consommation d'oxygène (< 1.5 millilitres.kilogramme⁻¹.minute⁻¹ – ml.kg⁻¹.min⁻¹) malgré l'augmentation de la puissance de l'exercice. Ce phénomène représente le facteur le plus évident permettant de confirmer l'atteinte de la VO₂ Max [9]. Cependant, il arrive que ce plateau ne soit pas atteint. La valeur alors obtenue doit alors être appelée *pic de consommation d'oxygène* (VO₂Pic) [9]. En présence d'une telle situation,

d'autres facteurs peuvent nous amener à conclure que le sujet a bel et bien atteint la VO_2 Max. La littérature scientifique propose différents critères de détermination de la VO_2 Max. Dans une analyse des principales revues depuis le début des années 1990 jusqu'à ce jour, Midgley[10] relève près de quarante critères différents. Voici les plus souvent utilisés.

- Augmentation de la concentration de lactate sanguin au-delà de 8 millimolles par litre (mmol.L^{-1})
- Quotient respiratoire (QR) au-delà ou égal à 1.
- Fréquence cardiaque se rapprochant de la valeur maximale prédite en fonction de l'âge.
- Épuisement du sujet.

Il est cependant fort intéressant de noter que dans la grande majorité des études relevées dans cette revue, les auteurs ne spécifient d'aucune façon les critères sur lesquels ils se sont basés pour déterminer l'atteinte de la VO_2 Max.

Déterminants

Selon l'équation de Fick décrite par Vandewalle[9], la consommation d'oxygène (VO_2) exprimée en millilitres par minute (ml.min^{-1}) est le produit du débit cardiaque (Q_c) et de la différence artério-veineuse en oxygène ($CaO_2 - CvO_2$) :

$$VO_2 (\text{ml.min}^{-1}) = Q_c * (CaO_2 - CvO_2)$$

Équation 3 – Consommation d'oxygène

À partir de cette équation, il est donc possible d'identifier les facteurs limitant la VO_2 Max et de les regrouper en deux catégories : les facteurs centraux et les facteurs périphériques. Bassett[7] propose quatre facteurs pouvant limiter la VO_2 Max.

1. La capacité de diffusion pulmonaire.
2. Le débit cardiaque maximal.
3. La capacité de transport de l'oxygène (O_2).
4. Le muscle squelettique.

Les trois premiers sont des facteurs centraux alors que les adaptations du muscle squelettique sont considérées comme étant périphériques. La question est de savoir laquelle de ces deux catégories de facteurs est la plus déterminante à l'égard de la VO_2 Max. Après avoir considéré les deux positions, Bassett[7] en arrive à la conclusion que *dans le domaine de la physiologie de l'exercice, lorsqu'il est question des facteurs limitant la VO_2 Max, on fait habituellement référence à des êtres humains sans désordre métabolique qui exécutent des exercices impliquant tout le corps au niveau de la mer. Dans ces conditions, il est clair que c'est la capacité du système cardiovasculaire (le cœur, les poumons et le sang) à transporter l' O_2 aux muscles qui est le principal facteur limitant la VO_2 Max et non la capacité de la mitochondrie à consommer l' O_2 .*

Cependant, la littérature scientifique fait aussi état d'adaptations périphériques en lien avec des améliorations de la VO_2 Max spécialement à la suite d'un entraînement par intervalles à haute intensité [11, 12]. Il apparaît donc que, selon le type d'entraînement, les améliorations de la VO_2 Max peuvent être liées à des facteurs périphériques et/ou centraux. Cet aspect sera abordé dans la section suivante portant sur l'entraînement de la VO_2 Max.

Entraînement

Puisque la VO_2 Max est facteur de performance important pour les coureurs de fond et de demi-fond[6], il est primordial pour un entraîneur et un athlète de déterminer de quelle façon il est possible d'améliorer cette composante.

En course à pied, la vitesse qui amène la VO_2 Max est appelée vitesse aérobie maximale (VAM). Comme il existe une relation linéaire entre la vitesse de course et la consommation d'oxygène pour des valeurs variant de 10 à 22 km.h⁻¹, ce paramètre permet de prescrire l'entraînement de façon précise en tenant compte des limites maximales du sujet[9].

Comme le souligne Midgley dans un article de revue[6], *l'intensité minimale devant être prescrite à l'entraînement pour améliorer la VO_2 Max dépend du niveau initial de l'athlète.* Devant cette perspective, il propose que plus le niveau de l'athlète est élevé, plus l'entraînement doit se faire à intensité élevée, c'est-à-dire à des vitesses de course permettant d'atteindre la VO_2 Max. Pour les coureurs de plus faible niveau, des intensités variant de 65 à 80% de la VAM seront suffisantes pour amener des améliorations de la VO_2 Max.

Helgerud[13], a formé quatre groupes expérimentaux de manière à déterminer quelles sont les intensités d'entraînement qui induisent les meilleurs bénéfices à l'égard de la VO_2 Max. Six étudiants universitaires déjà physiquement actifs forment chacun des groupes. Le protocole impliquait trois séances hebdomadaires de course à pied durant huit semaines. Les intensités sont basées sur la fréquence cardiaque maximale (FC max).

Protocole d'entraînement				
Groupe	Entraînement	Durée	Repos	Intensité
1	Continu	45 minutes (min.)	X	70% FC max
2	Continu	25 min.	X	85 % FC max
3	Intervalles	47*15 secondes (sec.)	15 sec. (actif)	95% FC max
4	Intervalles	4*4 min.	3 min. (actif)	90 à 95% FC max
Résultats (Moyenne (écart type))				
	VO_2 max ($ml \cdot l^{-1} \cdot kg^{-1} \cdot min$)		Débit cardiaque ($L \cdot l^{-1} \cdot min$)	
	Avant	Après	Avant	Après
1	55.8 (6.6)	56.8 (6.3)	30.29 (4.5)	30.05 (5.1)
2	59.6 (7.6)	60.8 (7.1)	25.73 (2.06)	26 (2.52)
3	60.5 (5.4)	64.4 (4.4)	29.78 (3.32)	32.59 (5.2)
4	55.5 (7.4)	60.4 (7.3)	28.45 (3.08)	31.43 (2.5)

Tableau 1 - Entraînement et résultats, Helgerud [13]

Les résultats démontrent que les groupes d'entraînement par intervalles ont significativement augmenté leur VO_2 Max ($p < 0.001$ et $p < 0.05$ pour 3 vs. 1 et 2 respectivement, $p < 0.001$ et $p < 0.01$ pour 4 vs. 1 et 2 respectivement) comparativement aux groupes d'entraînement en continu. Les auteurs rapportent également que ces améliorations sont liées à une augmentation du débit cardiaque. Il est cependant risqué de conclure que seul le débit cardiaque peut expliquer les gains en termes de la VO_2 Max si aucune mesure d'éventuelles adaptations périphériques n'a été prise.

D'ailleurs, les résultats de Cunningham[11] démontrent que de telles adaptations peuvent être induites. Pour ce protocole, 15 femmes sédentaires âgées de 18 à 25 ans sont invitées à participer à un programme d'entraînement en endurance.

Deux groupes expérimentaux sont comparés. Le premier travaille pendant 12 semaines à raison de 4 séances hebdomadaires à des intensités variant de 70 à 80% de la VO_2 Max. Le travail est fait en continu. Pour le deuxième groupe, le volume d'entraînement est le même mais on travaille par intervalles et l'intensité varie de 90 à 100%. Toutes les séances sont effectuées sur un vélo stationnaire.

Les résultats démontrent une amélioration significative ($p < 0.05$) de la VO_2 Max (+20%) chez les deux groupes. Il est très intéressant de noter que les gains induits sont reliés à des adaptations périphériques ($CaO_2 - CvO_2$) plus qu'à des adaptations centrales (Q_c) pour le groupe qui a travaillé par intervalles. Les auteurs suggèrent donc que pour amener des adaptations périphériques, l'entraînement doit être effectué à intensité élevée.

Pour expliquer la relation entre les intensités d'entraînement et le niveau des adaptations induites, Docherty[12] propose le modèle suivant:



Figure 3 - Continuum des intensités d'entraînement de la puissance aérobie maximale (PAM) et locations des adaptations induites[12]

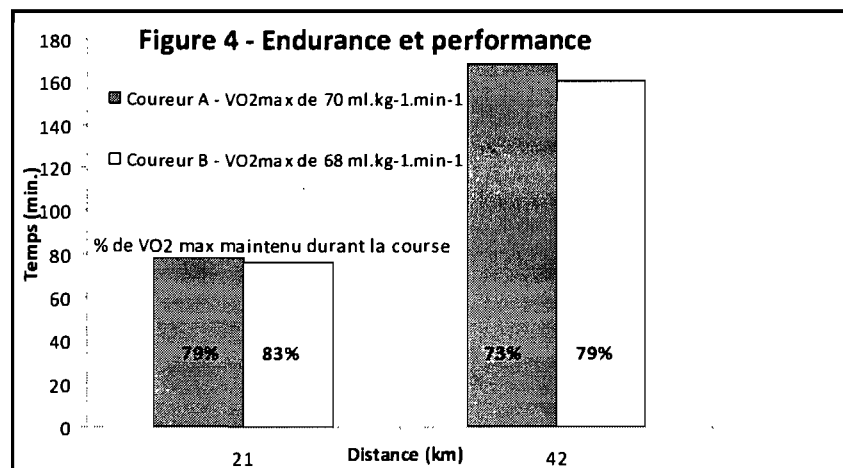
1.2.2 – Endurance

Définition

L'endurance fait référence, pour un athlète, à la capacité de performer dans des événements de longues durées[14]. Cependant, cette définition ne doit pas être confondue avec le concept d'endurance comme déterminant de la capacité aérobie. Dans ce cas, la définition proposée par Bosquet dans un article de revue[14] est la suivante :

L'endurance aérobie est la capacité de maintenir un pourcentage élevé de la VO_2 Max pour une longue période de temps

L'exemple classique pour représenter ce concept est illustré par la figure 4 à partir des données présentées dans la revue de Bosquet[15]. Malgré une VO_2 Max plus élevée, le coureur A est incapable de devancer le coureur B sur des distances de 21 et 42 kilomètres (km) puisque ce dernier est en mesure de maintenir un plus haut pourcentage de la VO_2 Max. Il est donc évident que l'endurance représente un facteur de performance important et indépendant de la VO_2 Max.



Évaluation

Plusieurs protocoles différents sont utilisés par les scientifiques et les entraîneurs afin d'obtenir un indice de l'endurance d'un sujet. Bosquet[14] divise ces méthodes en deux catégories : celles, dites directes, qui permettent d'obtenir un indice d'endurance à partir d'une performance du sujet comparée à une valeur maximale et celles, dites indirectes, qui se basent plutôt sur la relation qui existe entre l'endurance et certaines variables physiologiques (lactatémie, fréquence cardiaque et paramètres ventilatoires).

Trois importantes revues publiées récemment [16-18] proposent d'utiliser une mesure indirecte, le seuil lactate, afin d'obtenir un indice d'endurance. En réponse à un test incrémenté, la concentration sanguine en lactate augmente de façon curvilinéaire en fonction de la puissance de travail[19]. À partir de cette relation, plusieurs moyens différents ont été proposés pour déterminer un seuil à partir duquel la lactatémie augmente de façon marquée par rapport aux intensités plus faibles. Alors que toutes ces tentatives devraient mener à un seul et même seuil, chaque méthode semble donner un résultat différent. D'ailleurs, Bosquet[14] rapporte que lorsqu'elles sont rapportées en % de la $\dot{V}O_2$ Max, ces valeurs sont comprises dans un écart de près de 15%.

Il est possible de comprendre cette idée de seuil lactate en acceptant deux hypothèses. La première propose que le lactate ne soit produit qu'à partir d'une certaine puissance. La deuxième suggère que cette production de lactate soit provoquée par une hypoxie. Si la première hypothèse peut être réfutée puisqu'il semble évident que le muscle produit du lactate dès les puissances de travail les plus faibles[19], la deuxième n'est pas sans équivoque. Alors que certains auteurs avancent que l'entraînement à haute intensité amène le muscle en hypoxie[12, 20], d'autres prétendent que le muscle qui travaille, même à intensité maximale, ne semble pas être en hypoxie[19].

Malgré cette conception de seuil qui semble erronée, il n'en demeure pas moins qu'il existe un fort lien entre la relation lactatémie/puissance et la performance en course à pied. D'ailleurs, Péronnet[19], propose que *les corrélations qui existent entre la vitesse ou le $\dot{V}O_2$ au seuil lactate et la performance peuvent refléter l'état d'entraînement d'un athlète et/ou son endurance et ce même si cette puissance ne correspond pas à un seuil et même si un tel seuil n'existe pas.*

Dans le cas des mesures directes en course à pied, trois types de tests sont principalement utilisés[14]. Pour chacun de ces tests, une variable (le travail, la durée ou l'intensité) est prédéterminée. Pour une épreuve de travail constant, on demande au sujet de franchir une distance donnée le plus rapidement possible. Dans le cas où la durée du test est connue à l'avance, le sujet doit parcourir la plus grande distance possible alors que pour un test à puissance fixe (aussi appelé *temps limite*), l'effort doit être maintenu le plus longtemps possible.

Alors que la fiabilité des tests à travail constant et à durée fixe est assez bonne pour évaluer l'endurance[14], une attention particulière doit être portée aux tests pour lesquels la fin est indéterminée (*temps limite*). Si l'intensité prescrite est sous-maximale, Bosquet[14] rapporte que ces épreuves sont peu reproductibles en raison de facteurs psychologiques pouvant affecter la performance du sujet. En effet, la motivation du sujet dans ce type d'effort doit certainement être considérée comme étant un possible aspect affectant la performance. Pour résoudre cette problématique liée aux tests à puissance fixe, il est possible de prescrire des intensités maximales. Cependant, Bosquet[14] émet quelques réserves à l'égard de ces tests. D'abord, la prudence est de mise dans le choix de l'intensité maximale. De petites variations de la puissance maximale prescrite peuvent avoir un effet important sur le résultat du test. D'autre part, il est suggéré que la capacité anaérobie du sujet peut influencer le temps de maintien d'un effort maximal. De plus, il est possible que certains coureurs avec une VO_2 Max semblable ne réussissent pas aussi bien les épreuves de temps limite selon l'intensité prescrite. En effet, des athlètes, selon leur spécialité, peuvent être plus endurants lorsque la puissance est faible alors que d'autres le seront plus lorsque l'intensité est maximale.

À partir du concept de puissance critique proposé par Monod et Scherer[21], il est possible d'obtenir un indice d'endurance valide. La puissance critique est définie comme étant *la plus haute intensité pouvant être maintenue durant une longue période de temps, sans fatigue*. Pour la déterminer, il s'agit de faire réaliser au moins deux tests de puissance constante (temps limite) à l'athlète. Les puissances choisies doivent être différentes et permettre un effort variant de trois à trente minutes. À partir de la relation hyperbolique entre la puissance et le temps d'effort, il est possible de tracer une asymptote, laquelle valeur représente la puissance critique[22]. Cette puissance n'est pas significativement différente de la puissance développée au seuil lactate par un groupe de coureurs élités[23].

Bosquet[14] souligne que la puissance critique est fortement corrélée à la performance en course à pied sur des distances variant de 1000m à 42 km.

Il semble donc que, malgré quelques limites, il est possible de bien évaluer le niveau d'endurance d'un athlète en effectuant des tests de terrain de toutes façons plus accessibles et spécifiques que les mesures de laboratoire[14].

Déterminants

La capacité de maintenir un haut pourcentage de la VO_2 Max durant une longue période de temps semble être déterminée par un ensemble de facteurs. Coyle[24] propose que l'interaction entre les phénomènes d'hyperthermie et de déshydratation limite en grande partie l'endurance.

D'une part, on estime à environ 25% le rendement mécanique du corps humain à l'exercice [24]. Il faut donc comprendre que 75% de l'énergie libérée par l'oxydation des substrats se dissipe sous forme de chaleur. Cette hausse de la température corporelle est liée à une diminution du volume plasmatique dont la conséquence est une augmentation de la fréquence cardiaque et à une réduction du volume d'éjection systolique. L'hyperthermie peut également causer une diminution de l'efficacité du système nerveux central et ainsi rendre plus difficile le recrutement des unités motrices[24].

D'autre part, dans le but de d'évacuer la chaleur, le corps humain sécrète de la sueur. Les quantités de transpiration peuvent varier d'un à deux litres par heure lors d'un exercice intense[24]. Ce phénomène provoque également une diminution du volume d'éjection systolique qui ne peut être compensée par une augmentation de la fréquence cardiaque. En résulte donc une diminution du débit cardiaque[24]. Il faut ajouter à ce phénomène le fait que le territoire cutané est aussi vasodilaté afin de permettre une plus grande évacuation de la chaleur[25]. Cette adaptation se fait souvent au détriment du muscle afin d'éviter une trop grande hyperthermie[25]. L'apport en oxygène et en substrats vers le muscle est ainsi moindre. Une déshydratation causée par un mauvais remplacement des fluides perdus à l'exercice peut à son tour engendrer une hyperthermie[24]. Ces deux phénomènes sont donc étroitement liés et il devient très important de les éviter en planifiant une stratégie de remplacement des fluides adéquate.

Il faut également considérer d'autres aspects pouvant déterminer l'endurance. Coyle[24] rapporte des données selon lesquelles le niveau d'endurance d'un cycliste est positivement corrélé au pourcentage de fibres de type 1 présentes dans le muscle de l'athlète. De même, plus la densité mitochondriale et capillaire est élevée, mieux le muscle est perfusé en oxygène et meilleure est la respiration cellulaire[24]. Finalement, la fatigue dans des événements de longue durée effectués dans un environnement frais est associée à une diminution importante des réserves de glycogène[24]. Il semble donc que la capacité à maintenir ces réserves à un haut niveau grâce à l'ingestion de glucose pendant l'exercice et/ou grâce à une plus grande utilisation des lipides comme substrat[17] est un facteur important de l'indice d'endurance.

Entraînement

Dans la section consacrée à l'évaluation du niveau d'endurance, il a été démontré que le seuil lactate n'existait probablement pas. Devant ce fait, il devient problématique d'utiliser cette référence dans la prescription des intensités d'entraînement. Puisque plusieurs méthodes différentes sont utilisées pour déterminer ce seuil et que ces méthodes ne mènent pas toutes au même résultat, il est facile de comprendre que les effets reliés à des entraînements basés sur de telles valeurs ne sont pas sans équivoque. Il n'est donc pas surprenant que Midgley[17] ne soit pas en mesure de conclure sur l'intensité optimale à prescrire dans le but d'améliorer le niveau d'endurance. Alors que certains auteurs suggèrent que l'entraînement optimal doit être fait à des intensités inférieures au seuil, d'autres proposent des séances directement au seuil ou au delà de ce seuil. Il semble donc n'y avoir aucune justification à utiliser une mesure indirecte de l'endurance pour prescrire l'entraînement. Par contre, comme la relation lactate/puissance peut se déplacer vers la droite à la suite d'une période d'entraînement, il est possible de s'en servir comme outil de référence permettant de mesurer les adaptations à un entraînement. Il suffit de suivre n'importe quel point sur la courbe de lactatémie en réponse au stimulus et d'exprimer cette valeur en pourcentage de la VO_2 Max[14].

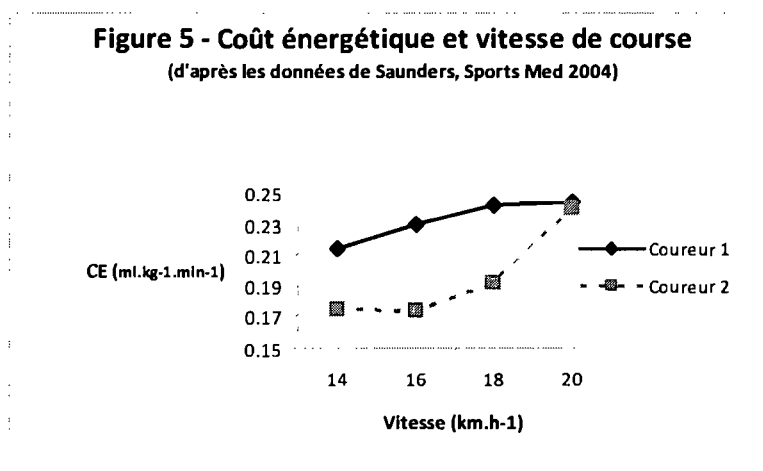
Peu de recherches ont été faites concernant la prescription de l'entraînement à partir d'intensités mesurées lors de tests directs[14]. Cependant, l'étude de Jenkins[26] démontre qu'un entraînement réalisé à la puissance critique permet d'améliorer le niveau d'endurance. Pour ce projet, 12 sujets masculins non entraînés ont entamé un protocole de 8 semaines d'entraînement sur vélo à raison de 3 séances hebdomadaires. L'intensité

prescrite correspondait à la puissance critique et devait être maintenue de 30 à 40 minutes. Lorsque comparés avec un groupe contrôle, les sujets entraînés ont augmenté significativement ($p < 0.01$) leur puissance critique de 30%.

1.2.3 – Coût énergétique

Définition

Le coût énergétique en course à pied (CE) exprimé en $\text{ml.kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$ a été défini comme étant la quantité d'énergie utilisée pour parcourir une distance donnée[27]. Le volume d'oxygène utilisé pour courir à une vitesse donnée reflète la demande énergétique induite par cet effort. Ainsi, lorsque la masse corporelle est prise en considération, un coureur économe utilise moins d'énergie et donc consomme moins d'oxygène pour une vitesse donnée et ce indépendamment de la $\text{VO}_2 \text{ Max}$ [27]. Lors de travaux effectués sur des animaux, Kram[28] suggère que le coût énergétique est indépendant de la vitesse. En effet, il semble que la demande énergétique pour courir une certaine distance est la même peu importe le temps mis pour la franchir. Les différences entre individus peuvent être expliquées en partie par le travail plus ou moins efficace du système muscle/tendon qui est chargé de transporter et d'accélérer le corps et ses segments. La figure 5 illustre bien ces différences du CE pouvant être notées malgré une $\text{VO}_2 \text{ Max}$ semblable.



Il semble que lorsque des individus présentent des valeurs de la $\text{VO}_2 \text{ Max}$ semblables, le coût énergétique devient un important facteur de performance. C'est la conclusion tirée par Conley et Krahenbuhl[29] à la suite d'une étude réalisée avec des coureurs de niveau national dont la spécialité était le 10km. Douze hommes ont été testés de façon à connaître la $\text{VO}_2 \text{ Max}$ de chacun de même que le CE à trois vitesses sous-

maximales. Les tests de CE étaient tous d'une durée de six minutes. Les auteurs ont tenté d'établir des corrélations entre la performance sur 10km et le CE pour les trois vitesses mesurées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.

	VO2 max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	Performance - 10 km (sec)
Moyenne	71.7	1930
Écart type	2.8	60
Corrélations entre la performance sur 10km et le CE		
	Vitesse (km.h ⁻¹)	Corrélations
p<0.01	14.46	0.83
p<0.01	16.08	0.82
p<0.01	17.7	0.79

Tableau 2 - CE et performance en course à pied[29]

Pour toutes les vitesses sous maximales évaluées, le CE est significativement lié à la performance. Les coureurs les plus économes sont aussi ceux qui obtiennent les meilleures performances sur 10 km.

Évaluation

Afin d'être conforme à la définition proposée par Morgan[30] il est important d'obtenir un état stable de la consommation d'oxygène afin de pouvoir déterminer un CE. À cet égard et en considérant la cinétique d'utilisation d'O₂ en réponse à l'augmentation de la puissance de l'exercice, il semble important de mesurer le CE à une vitesse sous-maximale stable après au moins 4 minutes d'effort[31]. Saunders[27] suggère que cette vitesse doit permettre d'atteindre des valeurs égales ou inférieures à 85% de la VO₂ Max chez des coureurs bien entraînés.

Même si la course à pied est souvent pratiquée à l'extérieur, le CE est souvent mesuré en laboratoire sur un tapis roulant. Il faut donc être prudent dans l'interprétation des données. Les conditions du laboratoire ne sont pas exactement les mêmes que celles retrouvées sur le terrain[27]. En effet, la résistance de l'air et la technique de course peuvent affecter le CE et sont susceptibles de varier d'une condition expérimentale à l'autre. Malgré cette observation, Saunders[27] rapporte que la mesure du CE en laboratoire est une bonne façon d'évaluer ce facteur de performance en course à pied.

1.3 – Coût énergétique : facteurs déterminants et interventions

À partir des travaux de Morgan et de Saunders [27, 30, 32], il est possible de regrouper les facteurs qui déterminent le CE en deux catégories : les méthodes d'entraînement et la biomécanique. Ces deux composantes interagissent entre elles en fonction des adaptations induites par les méthodes d'entraînement privilégiées. Dans cet ouvrage, il sera question des différentes méthodes d'entraînement ainsi que de leur interaction avec le volet *cinétique* de la biomécanique.

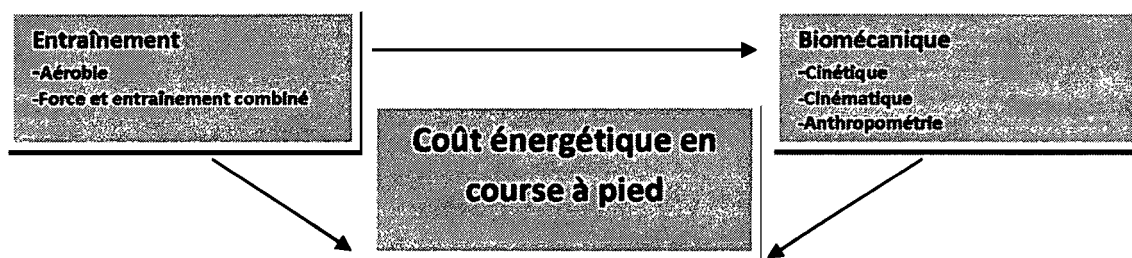


Figure 6 – Déterminants du coût énergétique

1.3.1 – Entraînement aérobie

En se référant aux travaux de Franch[33], on constate qu'il est possible d'améliorer le CE simplement en ajoutant des entraînements de course à une intensité élevée. Trois groupes de coureurs ont été formés. Tous les sujets (36) sont des hommes âgés dans la trentaine pour qui la course est une activité récréative depuis au moins deux ans. En moyenne, chaque sujet passait avant l'étude 2.2 heures par semaine à l'entraînement. Le coût énergétique a été mesuré à la dixième minute d'un test effectué à 85% de la VO_2 Max. Le tableau 3 résume le protocole d'entraînement suivi pour chaque groupe.

Groupe	Intensité	Séries	Temps d'effort	Repos
Continu	93% FC max	1	20 à 30 minutes	X
Intervalles longs	94% FC max	4 à 6	4 minutes de course	2 minutes
Intervalles courts	92% FC max	30 à 40	15 secondes	15 sec.

Tableau 3 - Protocole d'entraînement, étude de Franch[33]

Ce protocole a induit des adaptations positives du CE pour les groupes d'entraînement en continu et en intervalles longs. En effet, des améliorations significatives de l'ordre de 3.2 ($p<0.05$) et 3.5% ($p<0.01$) ont été observées pour ces deux groupes

respectivement. À la lumière de ces résultats, il apparaît que l'entraînement en course à haute intensité d'une durée d'au moins quatre minutes appliqué à des coureurs de niveau récréatif est positif en regard du CE.

Une étude réalisée[34] chez des joueurs de *soccer* de niveau élite donne des résultats similaires à ceux de Franch. Le groupe expérimental de cette étude devait s'entraîner en course deux fois par semaine. Le programme prescrit consistait en quatre séries de quatre minutes de course à une vitesse permettant d'atteindre 90 à 95% de la FC max. Entre chaque période d'effort, le repos actif était d'une durée de trois minutes pendant lesquelles les sujets devaient maintenir la fréquence cardiaque entre 50 et 60% du maximum. Ce protocole d'une durée de huit semaines était un supplément au match et aux entraînements hebdomadaires du club pendant lesquels techniques, tactiques, force et sprints étaient au menu.

Les auteurs de cette étude rapportent une amélioration significative ($p < 0.05$) du CE de l'ordre de 6.7% pour le groupe expérimental à la suite de l'entraînement par intervalles à haute intensité.

Il semble donc qu'il est possible d'induire des adaptations positives du CE lorsqu'un entraînement par intervalles à haute intensité est ajouté à la charge d'athlètes ayant une bonne expérience en course.

1.3.2 – Force et entraînement combiné

L'étude de Paavolainen[5] met en évidence les effets positifs d'un entraînement en force sur le CE. Dans ce projet, 12 coureurs de niveau élite remplacent 32% de leur entraînement habituel en course par des exercices de force explosive. Les séances sont composées de sprints, de sauts, de rebonds sans charge autre que le poids corporel ainsi que d'exercices impliquant les extenseurs et les fléchisseurs de la jambe effectués avec une résistance additionnelle comprise entre 0 et 40% de la capacité maximale des sujets. Tous les exercices doivent être faits avec une grande vitesse. Les résultats de cet entraînement d'une durée de neuf semaines ont été comparés avec ceux obtenus par 10 coureurs de même niveau ayant complété le protocole sans avoir effectué les exercices de musculation. Il est très intéressant de noter l'interaction statistique ($p < 0.05$) entre les deux groupes en ce qui concerne la performance sur 5 km. Le groupe ayant remplacé des entraînements en course par des exercices de musculation de type explosif obtient l'avantage après neuf

semaines de ce traitement sans avoir subi de modification de la VO_2 Max. Une autre interaction ($p < 0.01$) se manifeste après le protocole en ce qui concerne le CE, et ce, toujours en faveur du groupe force explosive. Les auteurs rapportent que l'amélioration de 5% du CE peut expliquer jusqu'à près de 4% des améliorations de performance sur 5 km.

Une autre étude, celle de Millet[35] rapporte également une amélioration significative du CE à la suite d'un entraînement en force. Cette fois, quinze coureurs bien entraînés sont répartis en deux groupes. Sept d'entre eux ajouteront deux entraînements hebdomadaires en force maximale (FM) à leur entraînement en course habituel alors que les huit autres sont placés dans un groupe contrôle n'effectuant que les entraînements en course (C). Il faut noter que sur l'ensemble des coureurs, sept sont de niveau international et sont répartis dans les deux groupes (trois dans le groupe FM). Durant les quatorze semaines d'entraînement, le groupe FM doit réaliser des exercices pour muscler l'ensemble du membre inférieur (fléchisseurs et extenseurs de la jambe, mollet). La prescription est de cinq séries de trois à cinq répétitions avec une charge correspondant au moins à 90% de la capacité maximale du sujet. Les résistances sont ajustées afin de maintenir ce principe tout au long de l'étude. Les résultats vont dans la même direction que ceux obtenus par Paavolainen. En plus de noter une amélioration significative ($p < 0.05$) de la force maximale sans modification de la VO_2 Max, les sujets du groupe FM ont également profité des améliorations du CE comme en témoigne l'interaction ($p < 0.05$) post-entraînement avec le groupe contrôle.

Malgré que la démonstration des effets bénéfiques d'un entraînement combiné en force et en endurance sur le CE soit claire, il semble que les athlètes ne veulent pas inclure cette pratique dans leurs routines d'entraînement. En effet, l'équipe d'Esteve-Lanao[36] rapporte les habitudes d'entraînement d'un groupe de coureurs espagnols de niveau national. La période couverte s'échelonne sur six mois. Ces travaux permettent de comprendre que les athlètes s'entraînent en course 92% du temps à des intensités inférieures à 85% de la VO_2 Max et seulement 8% du temps à des puissances supérieures. Aucune donnée rapportée par cette équipe ne fait mention de l'ajout d'entraînements en force. Bien qu'il soit nécessaire d'être prudent avant de généraliser cette situation à l'ensemble des coureurs de la planète, on peut comprendre que l'entraînement en force suscite le doute quant à sa pertinence.

Un des effets les plus reconnus de ce type d'entraînement est l'hypertrophie[37]. Cette augmentation de la surface de section transversale du muscle n'est pas souhaitable puisque le coureur doit inévitablement transporter le poids corporel supplémentaire engendré par ce type d'entraînement[38]. De plus, les travaux de Chilibeck[39] proposent que l'entraînement en force induisant une hypertrophie provoque une diminution de la densité mitochondriale. Tel que décrit à la section 1.2.2, c'est plutôt le contraire qui est souhaité pour les coureurs.

Comme dans le cas de l'entraînement de la puissance aérobie maximale (figure 3 - section 1.2.1), il est possible de modifier les intensités prescrites dans le cadre d'un entraînement en force. De telles modifications peuvent avoir un effet important sur les adaptations subséquentes. Il devient donc très important de bien comprendre ces variables afin de pouvoir obtenir le maximum de bénéfices. La prochaine section présentera les modèles scientifiques permettant de répondre à ces questions.

1.3.2.1 - Entraînement en force : adaptations centrales et périphériques

Le modèle de Docherty[12] présente le continuum des intensités de l'entraînement en force ainsi que les adaptations qui y sont associées.

L'auteur propose que des résistances élevées ne permettant que trois à six répétitions du mouvement par série d'exercices induisent principalement des adaptations du système nerveux central. Ce phénomène se manifeste entre autres via une augmentation de l'activation des unités motrices. Gabriel[40] rapporte qu'un entraînement en force peut améliorer la fréquence de stimulation et la synchronisation des unités motrices. Un autre mécanisme démontrant une adaptation du système nerveux central est la co-contraction des muscles antagonistes. Celle-ci est moindre après un entraînement en force et permet donc un meilleur travail des muscles agonistes[40].

À l'autre extrémité du continuum, on retrouve les adaptations périphériques induites par un entraînement en force à une intensité permettant au maximum (max.) de huit à douze répétitions du mouvement par série d'exercices. La principale adaptation alors obtenue est l'hypertrophie des fibres musculaires. La production d'hormones de croissance à la suite d'un entraînement semble liée à la synthèse protéique et à l'hypertrophie des fibres de type 1 et 2[12, 41]. Zafeiridis [42]rapporte que ce type d'hormone est sécrété en plus grande quantité ($p<0.05$) lorsque l'entraînement est effectué de manière à permettre

dix à quinze répétitions comparativement à un programme visant un maximum de cinq mouvements.



Figure 7 - Continuum des intensités d'entraînement de la force musculaire et localisations des adaptations induites[12]

En examinant ce modèle, on peut donc en arriver à la conclusion que pour des coureurs voulant éviter les effets négatifs reliés à une augmentation de la masse musculaire, il est malgré tout possible de viser des gains en force en sollicitant davantage le système neuromusculaire. Cependant, ce schéma n'est pas parfait car il ne tient pas compte des efforts dits explosifs pour lesquels l'objectif n'est pas tant l'épuisement induit par la répétition de mouvements que l'atteinte de la puissance maximale[43]. À cet égard, les méthodes proposées par Paavolainen[5] seront détaillées dans la prochaine section. Par contre, dans l'esprit du principe de spécificité de l'entraînement[44], le type d'entraînement proposé par Millet, bien qu'efficace pour améliorer le CE et en accord avec le modèle de Docherty, sera laissé de côté considérant qu'il ne soit pas nécessaire pour des coureurs de travailler avec des résistances maximales qui peuvent en plus être responsables de douleurs au dos si l'entraînement est mal planifié[45].

1.3.2.2 - Méthodes privilégiées : Efforts dynamiques et pliométrie

L'étude de Paavolainen[5] regroupe deux méthodes d'entraînement dits explosifs qui peuvent être séparées en deux catégories : la pliométrie et les efforts dynamiques.

Pliométrie

La pliométrie est définie comme étant une méthode qui amène une contraction excentrique du muscle suivie immédiatement après par une contraction concentrique. Cet enchaînement d'actions est appelé cycle d'étirement/raccourcissement[46]. Dans ce cas, on fait appel à la capacité du système musculotendineux à restaurer, pour la phase concentrique, l'énergie élastique emmagasinée à la suite de la phase excentrique [46, 47].

En pratique, on peut solliciter cette qualité pour le membre inférieur en effectuant par exemple des sauts et des rebonds. En résulte, en plus des gains possibles sur le CE, une capacité accrue à développer de la puissance[43] et une amélioration dans des activités de sauts et de sprints [5, 47, 48]. Cette méthode est par ailleurs reconnue pour induire des adaptations principalement au niveau du système nerveux central sans modifier significativement la surface de section transverse du muscle[46].

Efforts dynamiques

Les efforts dynamiques sont définis par Wilson[43] comme étant un entraînement visant à atteindre une puissance mécanique maximale à l'aide de charges correspondant typiquement à environ 30% de la résistance maximale pouvant être soulevée par un sujet. Par contre, il faut avant tout que cette résistance permette d'atteindre la puissance maximale et des différences individuelles doivent être attendues [49]. Comme la puissance est le produit de la force et de la vitesse[49], il faut donc qu'il y ait compromis entre ces deux variables afin d'atteindre une puissance maximale. En effet, plus la vitesse du mouvement est grande, moins le sujet est capable de développer une grande force.

Cette méthode est reconnue pour induire des adaptations du système nerveux central en améliorant l'activation et la synchronisation des unités motrices[49]. Considérant le modèle de Docherty et qu'il est recommandé de faire trois à six répétitions du mouvement afin de s'assurer que la puissance maximale est atteinte lors des entraînements [50], il est peu probable que des gains en hypertrophie surviennent. En pratique, les auteurs ont noté, en plus des avantages pour le CE, des améliorations de la puissance[43], de la vitesse de développement de la force (*Rate of Force Development*) [49] ainsi que des gains lors d'activités de sauts et de sprints [5, 43].

1.3.3 – Biomécanique : la cinétique

La cinétique est le terme général qui est donné aux forces internes et externes qui sont impliquées dans le mouvement humain[51]. Dans le cas de la course à pied, les forces externes viennent du sol en réponse à l'impact que chaque foulée produit tandis que les forces internes font référence aux interactions du système musculotendineux. Une analyse en ce sens devrait nous permettre de comprendre comment un entraînement en musculation induisant des adaptations neuromusculaires peut améliorer le CE.

1.3.3.1 – Raideur musculotendineuse

En course à pied, un modèle biomécanique décrit le comportement du membre inférieur comme un ressort réagissant aux contraintes imposées par la masse corporelle lors du contact au sol[52]. La raideur musculotendineuse (K exprimée en $N.m^{-1}$) est donc définie comme étant le rapport entre la contrainte imposée et la déformation obtenue[53]. En lien avec la performance sportive, la raideur détermine la capacité du muscle et du tendon à stocker puis à restituer l'énergie à la suite d'un mouvement excentrique. Alors que certains affirment que la raideur optimale doit être faible (on parle alors de compliance), d'autres proposent que la raideur doit être élevée.

Il faut remonter à une étude faite chez le kangourou pour bien comprendre le concept de compliance. Les bases de cette étude sont que cet animal semble consommer moins d'oxygène, donc être plus économe, au-delà d'une certaine vitesse. L'hypothèse alors posée pour expliquer ce phénomène est que l'animal est en mesure d'utiliser l'énergie élastique emmagasinée puis restituée via le système musculotendineux. Les auteurs de cette étude en viennent à la conclusion que cette qualité du kangourou est due à un tendon d'Achille long et compliant[54]. Il est évident que l'être humain ne possède pas les mêmes avantages mécaniques que le kangourou pour effectuer des rebonds à répétition. Cependant, des études faites chez les humains semblent appuyer cette hypothèse. Les résultats obtenus proposent également que la compliance est liée positivement au CE dans le cas du tendon du quadriceps[55] et du tendon d'Achille[56].

À l'opposé, d'autres auteurs affirment que la raideur doit être élevée afin de diminuer le CE. C'est le cas de Spurr[57] qui a vérifié les effets d'un entraînement de 6 semaines en pliométrie sur la performance en course à pied. Dans cette étude, le CE a été mesuré pour trois vitesses de course alors que la raideur a été mesurée à l'aide d'une cellule de charge qui permet de recueillir les oscillations résultant du support d'une charge

correspondant à 50% de la force isométrique maximale du triceps sural. Ces mesures de raideur ont été effectuées sur les deux jambes de chaque sujet. Les résultats démontrent que les coureurs ayant le plus diminué le CE sont aussi ceux qui ont le plus augmenté la raideur musculaire. Les corrélations obtenues sont présentées dans le tableau 4. Cette hypothèse selon laquelle la raideur optimale doit être élevée est également soutenue par Dalleau[58] et Heise[59].

	Variations CE		
	12 km.h ⁻¹	14 km.h ⁻¹	16 km.h ⁻¹
Variations Raideur			
Gauche	**-.065	*-.052	*-.052
Droite	*-.044	*-.044	*-.051
**p<0.01 - *p<0.05			

Tableau 4 - Corrélations entre la raideur musculaire et le CE[57]

1.3.3.2 – Forces de réaction de sol

Kram[28] propose que chez l'animal, le CE est déterminé principalement par le coût associé au support du poids au sol ainsi que par le temps pendant lequel cette force doit être appliquée. À chaque contact au sol, le coureur doit activer des muscles pour stabiliser le corps et maintenir la direction prise[60]. Les forces de réaction au sol permettent de mesurer l'amplitude de ces exigences musculaires. Kyrolainen[61] rapporte que les coureurs les moins économes sont aussi ceux qui démontrent les plus grandes forces de freinage au sol. Les auteurs proposent que ce phénomène puisse être expliqué par une action trop limitée des muscles fléchisseurs de la jambe. Les résultats de l'étude de Paavolainen décrite à la section 2.1.2 vont dans la même direction. Les athlètes du groupe pliométrie ont diminué significativement ($p<0.001$) les temps de contact au sol par rapport au groupe contrôle. On se rappelle que ce sont ces athlètes qui ont aussi obtenus les meilleurs résultats en ce qui concerne le CE.

Le lien entre la raideur et les forces de réaction au sol est très étroit. À partir des travaux de Dalleau[62], il est possible de mesurer la raideur à partir du temps de vol et de contact au sol. Pour un temps de vol égal, plus le temps de contact est court, plus la raideur sera élevée. Les résultats de Kyrolainen et de Paavolainen concernant les forces de réaction au sol et les temps de contact tendent à appuyer l'hypothèse selon laquelle la raideur optimale est celle qui est la plus élevée. Devant autant de divergences observées dans la

littérature à l'égard de la raideur et de son effet sur le CE, il est clair que des recherches plus approfondies doivent être consacrées au sujet.

1.4 – Objectifs

L'objectif premier de cette étude est de déterminer si un entraînement combiné en force et en endurance peut avoir des effets bénéfiques sur la performance en course à pied. Dans cette optique, deux méthodes d'entraînement de la force seront comparées afin de déterminer laquelle a les meilleurs effets sur le CE.

1.5 – Hypothèses

En regard des données présentées dans la littérature, il est permis de croire que l'ajout d'un entraînement en force sera bénéfique pour des coureurs. La méthode d'entraînement en pliométrie, en raison de sa spécificité à la course, devrait présenter les meilleurs résultats.

2 – Expérimentations

2.1 – Méthodes

2.1.1 – Protocole

Une réunion d'information est organisée au préalable afin d'expliquer précisément l'étude aux participants intéressés, qui ont l'occasion de demander toutes les explications nécessaires. Les formulaires d'information et de consentement sont distribués. Les sujets disposent d'une période de réflexion d'une semaine pour donner leur accord et retourner le formulaire signé.

Le protocole est d'une durée totale de dix semaines. Huit semaines sont consacrées à l'entraînement alors que deux semaines de tests sont prévues, la première afin de mesurer les paramètres initiaux et la seconde afin de vérifier les effets de l'entraînement. À l'issue de l'évaluation pré-entraînement, les sujets ($n=30$) sont classés en fonction de leur pic de consommation d'oxygène (VO_2 pic). Deux groupes appariés à partir de ce paramètre sont constitués. Alors que le groupe P utilisera un entraînement pliométrique, le groupe D utilisera un entraînement dynamique.

2.1.2 – Entraînement

Les deux groupes réalisent le même entraînement de l'aptitude aérobie. Les sujets ajoutent à l'entraînement de l'aptitude aérobie une séance hebdomadaire d'entraînement de la force (efforts dynamiques ou pliométrie).

2.1.2.1 – Entraînement de l'aptitude aérobie

Les sujets participent à trois séances d'entraînement de l'aptitude aérobie par semaine. Trois types d'entraînement aérobie seront proposés aux sujets : endurance continue (60-65% VAM pendant quarante à soixante minutes), endurance intermittente (80-85% VAM pendant vingt à trente minutes) et VAM intermittente (95 à 110% VAM pendant dix à quinze minutes). L'échauffement est standardisé selon le protocole suivant: dix minutes de course à allure libre, cinq minutes d'étirements, puis cinq minutes d'exercices dynamiques (montées de genoux, talons aux fesses, etc.). Les sujets disposent d'une période libre de cinq minutes avant le début du corps principal de la séance. Le protocole de ces entraînements est présenté dans le tableau 5. Les intensités sont exprimées en pourcentage de la VAM.

	Séance 1			Séance 2			Séance 3	
Semaines	Volume	Intensité	Repos	Volume	Intensité	Repos	Volume	Intensité
1	Tests							
2	10*200m	105	40sec	4*5min	80	3	1*40 min	70
3	10*300m	102	60sec	5*5min	80	3	1*45 min	70
4	10*400m	100	90sec	6*5min	80	3	1*50 min	70
5	6*200m	105	40sec	3*5min	80	3	1*30 min	70
6	10*400m	100	90sec	2*10min	80	3	1*40 min	70
7	8*600m	98	120sec	3*10min	80	3	1*50 min	70
8	6*800m	96	150sec	2*15min	80	3	1*60 min	70
9	6*200m	105	90sec	1*30min	70		1*30 min	70
10	Tests							

Tableau 5 - Entraînement aérobic

2.1.2.2 - Entraînement de la force

Deux méthodes d'entraînement de la force sont utilisées : l'entraînement pliométrique (Groupe P) et l'entraînement dynamique (Groupe D). Le groupe D, en plus de l'entraînement de l'aptitude aérobic, réalise une séance hebdomadaire de développement de la force. Les sujets doivent exécuter entre trois et six séries de huit répétitions de demi squat (il s'agit d'un mouvement de flexion et d'extension de la hanche et des genoux avec une barre sur les épaules. Aucun mouvement excentrique n'est permis. L'angle de flexion des genoux est quatre-vingt-dix degrés (°)). La résistance choisie est celle qui a permis d'atteindre la puissance maximale au cours du test de puissance des membres inférieurs. Trois minutes de récupération sont accordées entre les séries. Le groupe P, en plus de l'entraînement de l'aptitude aérobic, réalise également une séance hebdomadaire de développement de la force. Les sujets doivent exécuter des « drop-jump », qui consistent à sauter en contrebas à partir d'un caisson de hauteur variable, puis d'enchaîner avec un saut vertical pour lequel la consigne est d'atteindre la plus grande hauteur possible. La hauteur choisie, entre vingt, quarante et soixante centimètres (cm), est celle qui permet d'atteindre la hauteur de rebond la plus grande possible. Le nombre de séries et de répétitions exécutées à chaque séance est identique à celui du groupe D. Le tableau 6 présente le protocole de l'entraînement de la force.

Semaines	Séries	Répétitions	Repos
1	Tests		
2	3	8	3 min.
3	4	8	3 min.
4	5	8	3 min.
5	Tests - ajustement charge/hauteur/puissance		
6	4	8	3 min.
7	5	8	3 min.
8	6	8	3 min.
9	3	8	3 min.
10	Tests		

Tableau 6 - Entraînement de la force

2.1.3 – Déroulement des tests

Tous les tests sont réalisés au Centre d'Éducation Physique et des Sports de l'Université de Montréal (CEPSUM), soit au laboratoire de physiologie de l'exercice, soit sur la piste d'athlétisme. Certains tests sont regroupés à l'intérieur d'une même session expérimentale. Il s'agit du test de puissance des membres inférieurs et du test de vitesse maximale puis du test de sauts et du test de performance. Au total, les sujets participent à trois sessions d'évaluation d'une durée moyenne de soixante minutes, et séparées d'au moins quarante-huit heures. L'ordre de ces sessions est randomisé selon une procédure déterminée par les expérimentateurs, et tirée au sort au moment de l'inclusion des sujets. Nous disposons de six combinaisons possibles. Il est à noter que les évaluateurs seront indépendants. Ils ne connaîtront pas le groupe d'appartenance des sujets.

2.1.3.1 – Test incrémenté

Le test incrémenté est réalisé au laboratoire de physiologie de l'exercice, sur tapis roulant. Dans un premier temps, le sujet doit courir pendant six minutes à 12 km.h⁻¹ afin de mesurer le coût énergétique. Il dispose de cinq minutes de récupération avant le début du test incrémenté. La vitesse initiale est de 13 km.h⁻¹ et augmente de 0.5 km.h⁻¹ toutes les minutes jusqu'à ce que le sujet ne soit plus capable de maintenir la vitesse requise.

2.1.3.2 – Test de puissance des membres inférieurs

Le test de puissance des membres inférieurs est réalisé au laboratoire de physiologie de l'exercice, avec une barre guidée. La consigne donnée au sujet est de soulever, sans effort excentrique préalable, la barre placée sur ses épaules le plus rapidement possible à partir de la position en demi squat, c'est-à-dire avec un angle de

flexion du genou de quatre-vingt-dix degrés, jusqu'à la position debout. Le mouvement doit être fait de manière explosive pour atteindre la plus grande vitesse de déplacement possible. La première charge correspond à la barre à vide. La résistance est ensuite augmentée par incréments de cinq à dix kilogrammes (kg) pour chaque essai jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Pour chaque résistance, le sujet doit réaliser trois essais consécutifs. Le meilleur résultat est alors conservé. Le test se termine lorsque la puissance développée diminue ou se stabilise malgré deux augmentations consécutives de la résistance. Une période de récupération de trois minutes est allouée entre chaque nouvel incrément de la charge.

2.1.3.3 – Test de vitesse maximale

Le test de vitesse maximale est réalisé sur la piste d'athlétisme synthétique du CEPSUM. Il s'agit de courir 30 m le plus vite possible après un départ lancé sur 20m. Trois essais séparés par cinq minutes de récupération sont accordés aux candidats.

2.1.3.4 – Tests de sauts

Les tests de sauts sont réalisés sur la piste d'athlétisme synthétique du CEPSUM. D'abord, il s'agit d'effectuer des sauts à une fréquence de 2 hertz (hz) pendant dix secondes, les mains sur les hanches. La consigne donnée est de diminuer le plus possible le temps de contact au sol tout en respectant la fréquence. La même procédure est répétée pour une nouvelle fréquence de 3hz. Ensuite, toujours les mains sur les hanches, le sujet doit sauter dix fois consécutives le plus haut possible tout en ayant un temps de contact avec le sol le plus court possible. Finalement, le sujet doit réaliser trois sauts en contre mouvement. La consigne donnée est de fléchir les jambes à quatre-vingt-dix degrés et d'enchaîner rapidement avec un saut le plus haut possible. Entre chaque test, un repos de cinq minutes est accordé au sujet.

2.1.3.5 – Test de performance

Le test de performance est réalisé sur la piste d'athlétisme du CEPSUM. Il s'agit de courir 3000 m le plus rapidement possible. Les sujets réalisent cette épreuve par groupes homogènes de trois, formés à partir de leur résultat au test incrémenté.

2.1.4 – Matériel et mesures

2.1.4.1 – Paramètres ventilatoires

Les paramètres ventilatoires et les échanges gazeux sont mesurés en circuit ouvert (Moxus, AEI Technologies, États-Unis) lors du test incrémenté.

2.1.4.2 – Puissance

La puissance au cours du test de puissance des membres inférieurs est mesurée au moyen d'un système Muscledlab (Ergotest, Norvège).

2.1.4.3 – Vitesse

La vitesse au cours du test de vitesse maximale est mesurée sur trente mètres au moyen de cellules photoélectriques (Speedtrap 2, Brower Timing System, États-Unis).

2.1.4.4 – Sauts

Les temps de vol et les temps de contact sont mesurés au cours de chaque saut au moyen d'un système Optojump (Microgate, Italie).

2.1.5 – Description des sujets

Notre étude concernera trente hommes volontaires sains (quinze sujets par groupe), recrutés par voie d'affichage au département de kinésiologie et au CEPsum.

2.1.5.1 – Critères d'inclusion

Les hommes âgés de dix-huit à quarante ans qui s'entraînent en course à pied au moins deux fois par semaine peuvent être inclus dans cette étude. Les sujets doivent également remplir avec succès le Q-AAP. Il s'agit d'un questionnaire d'aptitude à l'activité physique.

2.1.5.2 – Critères de non-inclusion

Toute contre indication médicale à la pratique d'une activité physique est susceptible d'entraîner un refus d'inclusion. Une pathologie somatique ou psychiatrique évolutive connue est également suffisante pour empêcher l'inclusion d'un candidat. De plus, les sujets ne doivent pas être impliqués dans un programme d'entraînement de la force dans les trois mois précédant le début de l'étude.

2.1.6 – Méthode d'analyse des paramètres mesurés

2.1.6.1 – Test incrémenté

Trois variables sont mesurées : le pic de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$ pic), le coût énergétique et la VAM. Le coût énergétique est obtenu à partir des données mesurées lors de la période de course de six minutes à $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Il est calculé en divisant le $\dot{V}O_2$ moyen des deux dernières minutes par la vitesse de course ($12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, soit $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$). $\dot{V}O_2$ pic est la valeur de $\dot{V}O_2$ la plus élevée au cours du test pendant une période de trente secondes. La VAM est la vitesse du dernier palier complété.

2.1.6.2 – Test de puissance des membres inférieurs

La puissance développée au cours de chaque répétition de demi squat est calculée en multipliant la force par la vitesse, afin de dresser la relation puissance – force et de déterminer la puissance maximale ainsi que la résistance qui lui est associée.

2.1.6.3 – Test de vitesse maximale

La vitesse est calculée en divisant la distance par le temps mis pour la parcourir au centième de seconde près. La vitesse maximale correspond à la vitesse du meilleur des trois essais.

2.1.6.4 – Test de sauts

La raideur musculaire est estimée à partir du temps de contact et du temps de vol pour chacun des sauts, selon la méthode proposée par Dalleau[62]:

$$K = M \bullet \pi(TV + TC) \bullet [TC^2 (\frac{TV + TC}{\pi} - \frac{TC}{4})]^{-1}$$

où K est la raideur musculaire (en N.m⁻¹), M est la masse (en kg), TV est le temps de vol (en secs.), TC est le temps de contact (en sec.).

La hauteur de saut est déterminée par l'équation suivante proposée par Lehanche[63] :

$$H \text{ (cm)} = g \text{ (tv)}^2/8$$

où g représente la gravitation et tv est le temps de vol.

2.1.6.5 – Test de performance

La vitesse moyenne au 3000 m est calculée en divisant la distance par le temps mis pour la parcourir (à la seconde près). Lors de ce test, un indice d'endurance est aussi calculé en exprimant la vitesse moyenne en pourcentage de la VAM.

2.1.7 – Analyse statistique

L'analyse des paramètres mesurés est réalisée au moyen du logiciel Statistica (Statsoft, Tulsa, Etats-Unis, version 6.0). La normalité de la distribution des paramètres étudiés est vérifiée au moyen du test Shapiro – Wilk et l'homoscédasticité au moyen du test modifié de Levenne. Une analyse de la variance à deux voies (Groupe x Temps) avec mesures répétées pour le facteur temps est réalisée. La sphéricité (homogénéité de la variance et de la covariance) est vérifiée au moyen du test de Mauchley. Si celui-ci est

significatif, les degrés de liberté sont ajustés selon la procédure de Huyn-Feldt lorsque la valeur d'*epsilon* est > 0.75, ou Greenhouse et Geisser lorsqu'elle est inférieure à 0.75[64]. Les comparaisons multiples sont réalisées au moyen du test post-hoc de Bonferroni. Lorsqu'une différence est significative, l'amplitude de l'effet (ou Effect Size) est calculée au moyen de la formule suivante :

$$ES = \frac{\overline{X_{\max}} - \overline{X_{\min}}}{SD_{\text{moyen}}}$$

où ES est l'Effect Size, et SD moyen est l'écart type moyen obtenu selon la formule suivante :

$$SDm = \sqrt{\frac{((S_1^2 * (n_1 - 1)) + ((S_2^2 * (n_2 - 1))))}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

où S1 et S2 représentent la variance de la moyenne la plus basse et de la moyenne la plus élevée parmi les moyennes comparées. La valeur obtenue est interprétée selon la grille proposée par Cohen[65]: si ES = 0.2, la différence est petite ; si ES = 0.5, la différence est moyenne ; si ES > 0.8, la différence est importante. Un risque α de 0.05 est retenu pour tous les tests.

2.2 – Résultats

Aucune différence significative n'a été observée pour l'ensemble des variables mesurées au début du protocole.

2.2.1 – Sujets

Trente sujets ont été inclus dans cette étude. Vingt-trois d'entre eux ont été en mesure de compléter le protocole dont onze dans le groupe P et douze dans le groupe D. Les abandons ont été causés par des blessures (n=4), un manque de motivation (n=2) et par la maladie (n=1). Les caractéristiques anthropométriques des sujets ayant complété l'étude sont présentées dans le tableau 7.

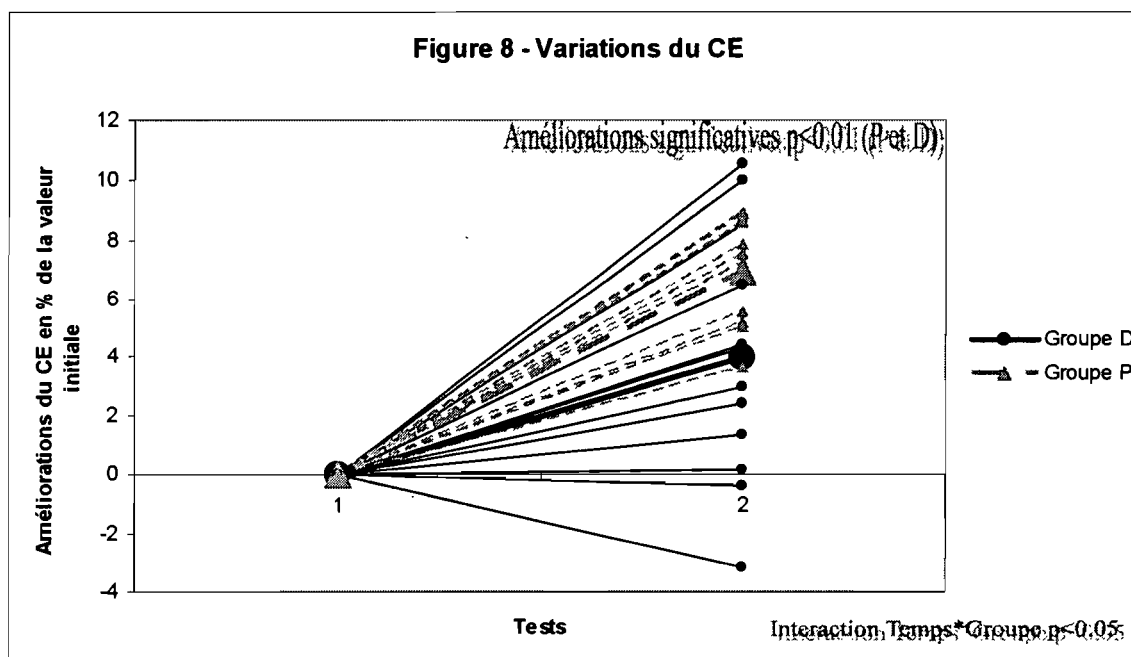
	Âge	Poids (kg)	Taille (cm)
Groupe	Test 1		
Dynamique	31.1 (6.9)	76.3 (8)	176 (6.6)
Pliométrie	28.6 (8)	74.6 (7.6)	177.6 (5.7)
	Test 2		
Dynamique	31.3 (7.1)	76.2 (8.6)	176 (6.7)
Pliométrie	28.6 (8)	74.6 (6.9)	177.6 (5.7)

Tableau 7 - Caractéristiques anthropométriques des sujets (n=23) Moyenne (SD)

2.2.2 – Capacité Aérobie

Les résultats des évaluations du CE sont présentées dans la figure 8. La moyenne du groupe D est passée de 0.207 ml.kg⁻¹.m⁻¹ (SD = 0.015) à 0.199 ml.kg⁻¹.m⁻¹ (SD = 0.012). Cette amélioration est significative (p<0.01, ES = 0.62). La moyenne du groupe P est quant à elle passée de 0.218 ml.kg⁻¹.m⁻¹ (SD = 0.016) à 0.203 ml.kg⁻¹.m⁻¹ (SD = 0.013). Cette amélioration est également significative (p<0.01, ES = 1.07). Une interaction significative temps*groupe (p<0.05) en faveur du groupe P a été observée.

Ces améliorations, lorsqu'elles sont exprimées en pourcentage de la valeur initiale, sont de l'ordre de 4% (groupe D) et de 7% (groupe P).



Le tableau 8 présente les résultats des sujets aux tests de consommation maximale d'oxygène ainsi que l'indice d'endurance qui est exprimé en pourcentage de la VAM maintenu au test de 3000m. Aucune différence significative n'a été notée à la suite de l'entraînement.

Groupe	VO ₂ pic (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	
	Test 1	Test2
D	57.5 (6.7)	56.1 (6.7)
P	57.5 (6.5)	57.3 (5.5)
	Indice d'endurance (%)	
	Test 1	Test2
D	87.1 (4.7)	87.1 (2.8)
P	87.6 (3.8)	88.6 (3.9)

Tableau 8 - VO₂ pic et indice d'endurance - Moyenne (SD)

2.2.3 - Qualités neuromusculaires

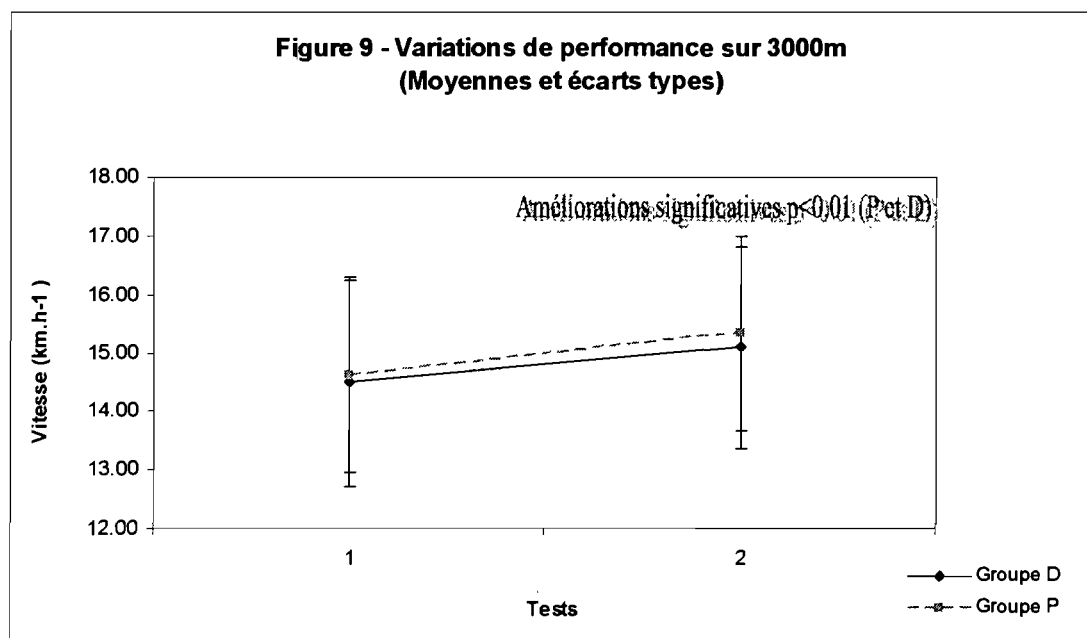
Le tableau 9 présente les résultats des coureurs aux différents tests des qualités neuromusculaires. Les résultats démontrent une amélioration significative de la puissance post entraînement pour le groupe D ($p < 0.01$, ES = 0.98) ainsi que pour le groupe P ($p < 0.01$, ES = 0.24). Une interaction significative temps *groupe est également présente en faveur du groupe D ($p < 0.05$). Des améliorations significatives ont aussi été notées pour les sauts en contre mouvement (Groupe D : $p < 0.01$, ES = 0.25 et Groupe P : $p < 0.01$, ES = 0.52).

			Raideur moyenne - (kN.m-1.kg)			
Groupe	Puissance - W	Sprint 30m - sec.	2 hz	3 hz	Max	CMJ - cm
	Test 1					
D	1147.2 (179.8)	3.91 (0.21)	21.03 (6.25)	34.25 (4.54)	19.20 (9.50)	33.42 (6.23)
P	1173.6 (139)	3.95 (0.25)	20.89 (6.31)	35.96 (4.60)	22.40 (8.29)	33.32 (4.04)
	Test 2					
D	1324.3** (181.5)	3.90 (0.25)	20.52 (4.17)	34.09 (3.90)	20.37 (7.32)	34.94* (6.06)
P	1214.6* (190.4)	3.91 (0.25)	19.09 (4.81)	36 (6.33)	19.04 (7.50)	35.31* (3.58)

Tableau 9 - Qualités neuromusculaires - Moyenne (SD) - *Améliorations post entraînement significative $p < 0.01$, **Interaction temps/groupe $p < 0.05$

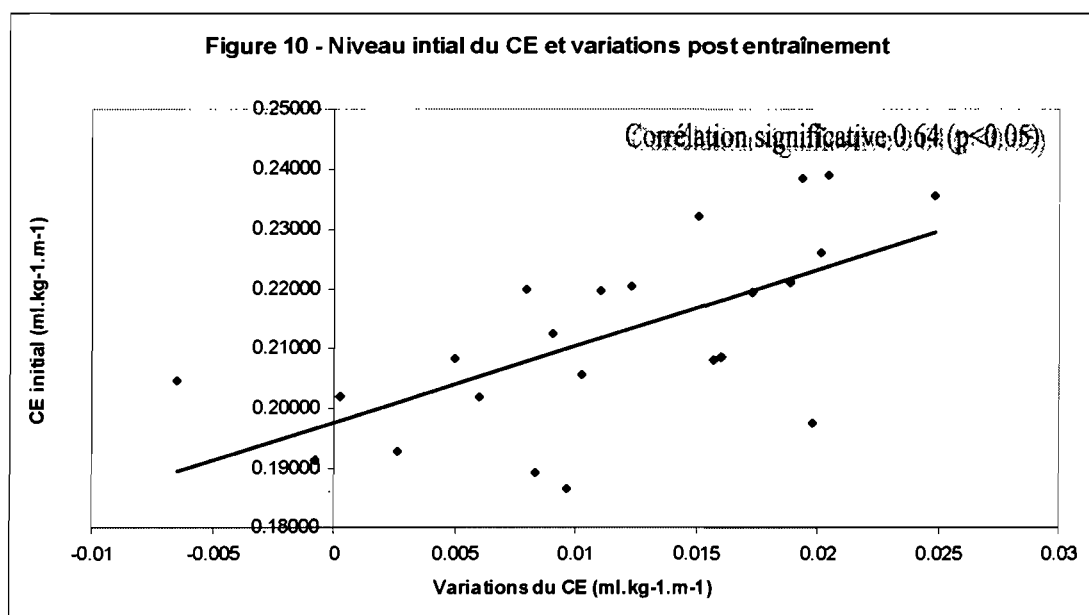
2.2.4 - Performance

La figure 9 démontre les résultats obtenus aux tests de performance sur 3000m. La vitesse moyenne du groupe D est passée de 14.5 km.h⁻¹ (SD = 1.8) à 15.1 km.h⁻¹ (SD = 1.7). Cette différence est significative ($p < 0.01$, ES = 0.37). Quant au groupe P, la moyenne est passée de 14.6 km.h⁻¹ (SD = 1.6) à 15.3 km.h⁻¹ (SD = 1.7). Cette différence est également significative ($p < 0.01$, ES = 0.46).



2.2.5 - Corrélations

La figure 10 présente la corrélation significative ($r=0.64$, $p<0.05$) retrouvée entre le niveau initial des coureurs pour le CE et les variations observées à la suite du protocole d'entraînement. Les coureurs qui ont présenté au départ un CE élevé sont aussi ceux qui ont connu les meilleures améliorations.



2.3 – Discussion

Le but premier de cette étude était de confirmer qu'un protocole d'entraînement combiné en force et en endurance pouvait améliorer le coût énergétique de la course sans effet délétère sur les autres composantes de l'aptitude aérobie. Dans cette optique nous avons comparé deux méthodes d'entraînement de la force explosive (efforts dynamiques et pliométrie) afin de déterminer laquelle avait les meilleurs effets en regard du CE.

Les résultats de cette étude nous permettent d'affirmer qu'un entraînement de la force explosive ajouté aux entraînements habituels de la capacité aérobie améliore le coût énergétique de la course sans modifier positivement ni négativement la VO_{2max} et l'endurance aérobie. La conséquence est une amélioration significative de la performance. Par ailleurs, il semble que la méthode d'entraînement en pliométrie soit plus avantageuse pour la performance en course. D'abord, une interaction significative ($p < 0.05$) en ce qui concerne le CE favorise les sujets du groupe P. Ensuite, l'amplitude de l'effet est plus grande en ce qui concerne la performance sur 3000m pour ce même groupe (0.37 vs. 0.46). Malgré que cette différence ne soit pas significative, il est possible de croire qu'un échantillon plus grand aurait permis d'atteindre cet objectif statistique.

2.3.1 – Capacité aérobie

2.3.1.1 – VO_{2max} et endurance

Les résultats de cette étude concernant la VO_{2max} et l'indice d'endurance indiquent que le protocole d'entraînement n'a engendré aucune amélioration de ces facteurs de performance. D'abord, ceci suggère que l'entraînement proposé durant huit semaines (hebdomadairement, en plus de l'entraînement en force : une session de VAM intermittente, une séance en endurance intermittente et une dernière session en endurance continue) ne représente pas un stimulus suffisant en termes d'intensité et de volume pour induire des améliorations chez des coureurs de ce niveau. Ces données confirment celles obtenues par les coureurs inclus dans l'étude de Spurr[s57] qui n'ont pas vu leur VO_{2max} ni leur niveau d'endurance modifié à la suite d'un protocole d'entraînement semblable à celui proposé dans ce projet. Les sujets de cette étude présentaient un niveau initial de la VO_{2max} équivalent ($57.6 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) à celui des hommes inclus dans le présent projet ($57.5 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$). Des résultats similaires ont également été avancés par d'autres auteurs [5, 35, 66, 67]. Il apparaît cependant que le volume et l'intensité prescrits ont permis aux coureurs de maintenir le niveau acquis avant le protocole.

Par ailleurs, en l'absence d'un groupe contrôle qui n'aurait fait que l'entraînement aérobie, il est difficile de conclure sur les possibles effets négatifs d'un entraînement combiné. Cependant, en considérant les données présentées dans la littérature, il apparaît que ce type de protocole ne soit pas néfaste envers la capacité aérobie [18, 68, 69]. Il semble donc, en regard des résultats obtenus, qu'il soit juste d'appliquer ces conclusions à ce projet.

2.3.1.2 – Coût énergétique et performance

Cette étude nous démontre que l'entraînement de la force explosive (efforts dynamiques ou pliométrie) a permis d'améliorer de façon significative ($p < 0.01$) le CE chez des coureurs amateurs ayant peu ou pas d'expérience avec ce type d'entraînement. L'amplitude des améliorations observées (4% groupe D et 7% groupe P) est similaire à ce qui est rapporté (de 2 à 8%) dans la littérature [5, 35, 67, 70]. Considérant que les autres facteurs de performance tels que décrits par Di Prampero[3] n'ont pas été modifiés, il est permis d'établir un lien de causalité entre les améliorations du CE et les gains significatifs en performance sur 3000m ($p < 0.01$) démontrés par les sujets des deux groupes. Ceci suggère que l'entraînement en force explosive doit être inclus dans la préparation physique des coureurs. Depuis les dix dernières années, plusieurs auteurs en sont arrivés aux mêmes conclusions [5, 35, 57, 67].

Cependant, ce projet de recherche est le premier à notre connaissance à comparer deux méthodes. Une interaction significative ($p < 0.05$) en faveur du groupe P nous indique que la pliométrie est une méthode privilégiée pour améliorer le CE. Ceci tend à être confirmé comme le démontre la relation entre la méthode utilisée et la performance au 3000m. Quoique non significative, l'amplitude de l'effet qui favorise la pliométrie ($ES = 0.46$ vs. 0.37) semble être un argument en faveur de l'utilisation de cette méthode.

La principale différence entre ces deux méthodes d'entraînement réside dans le type de contraction musculaire effectuée. Pour les efforts dynamiques prescrits dans cette étude, seule la phase concentrique est impliquée dans le mouvement. Dans le cadre des entraînements en pliométrie avec sauts en contre bas, les sujets sont forcés d'exécuter une phase excentrique très brève pendant laquelle s'accumule de l'énergie élastique pouvant être utilisée pour la phase concentrique qui suit[46]. Une étude réalisée sur des kangourous[54] démontre qu'au-delà d'une certaine vitesse, l'animal se met à bondir sur deux pattes et consomme ainsi moins d'oxygène qu'un autre mammifère de même poids courant à la même vitesse. Ce phénomène est expliqué par les auteurs comme étant le fruit

de la capacité de l'animal à restaurer l'énergie élastique accumulée dans les tendons et ligaments au moment de l'impact au sol. Cette qualité peut être liée à la compliance [54] ou à la raideur [57] de l'appareil musculotendineux. Une discussion de cet aspect est effectuée à la section 2.3.3.4.

Il semble donc, malgré que l'humain ne soit pas mécaniquement aussi avantage que le kangourou, que cet aspect de l'entraînement en pliométrie soit très important et nécessite une attention particulière à l'entraînement afin d'obtenir les plus grands bénéfices.

Par ailleurs, nous avons observé une corrélation significative de 0.64 ($p < 0.05$) entre le niveau initial du CE et les variations du CE dans le temps. Cette donnée nous indique que les sujets qui avaient au départ un CE élevé sont aussi ceux qui ont profité des plus grandes améliorations. Cette donnée met en lumière l'importance d'une bonne évaluation de cette composante afin de cibler les interventions à privilégier lors de l'entraînement. Il est intéressant de comparer ce phénomène aux observations apportées par Ebben [71]. Dans cette étude, des rameuses de niveau national affiliées à une équipe universitaire ont été séparées en deux groupes de manière à vérifier les effets de deux programmes d'entraînement de la force. Alors qu'un groupe travaillait en force endurance (volume élevé), l'autre s'entraînait en force maximale (résistance élevée). En plus des rameuses de niveau élite, d'autres athlètes de niveau novice ont été inclus dans chacun des groupes. Les résultats démontrent que les rameuses de tous les groupes ont amélioré leur performance sur 2000m. Cependant, les rameuses novice ont profité plus largement des entraînements en force endurance alors que les expertes ont bénéficié davantage de l'entraînement en force maximale. Il semble donc que le type d'entraînement en force doit être adapté au niveau de l'athlète afin d'en tirer les plus grands bénéfices en regard de la performance lors d'événements d'endurance. Il apparaît que ces résultats correspondent au modèle traditionnel de périodisation d'entraînement de la force (1- force endurance, 2- force maximale, 3-force puissance) [72]. Cela suggère donc que plus le niveau initial de l'athlète est élevé, plus l'entraînement de la force doit être orienté vers le développement de la force maximale et/ou de la force puissance.

2.3.2 – Qualités neuromusculaires

Le lien entre l'entraînement de la force et les améliorations du CE semble s'appuyer sur des facteurs neuromusculaires [18, 67, 70]. En effet, des variations de la raideur musculotendineuse ainsi que des améliorations de la synchronisation et du recrutement des unités motrices représentent les principales voies par lesquelles on tente d'expliquer les gains du CE à la suite d'un entraînement en force [18, 67, 70]. Le principal objectif des efforts dits explosifs est l'atteinte de la puissance maximale. En résultent alors, tel que décrit à la section 1.3.2.2, les adaptations du système nerveux central souhaitées [49, 63].

2.3.2.1 – Puissance

Les résultats obtenus par les coureurs des deux groupes inclus dans ce projet démontrent une augmentation significative ($p < 0.01$) de la puissance maximale atteinte à la suite de l'entraînement. À l'entraînement, les sujets devaient atteindre la puissance maximale mesurée lors de l'évaluation initiale, soit en utilisant une résistance optimale (groupe D), soit en utilisant une hauteur optimale pour les rebonds subséquents (groupe P). Il semble donc que cette intensité soit suffisante afin d'engendrer des gains significatifs de la puissance pour des coureurs n'ayant peu ou pas d'expérience avec ce type d'entraînement.

Ces données sont conformes à ce qui est présenté dans la littérature à savoir que, dans une perspective de développement des performances athlétiques, la résistance optimale est celle qui permet d'atteindre la puissance maximale [73]. Souvent cette résistance est exprimée en pourcentage de la résistance maximale pouvant être supportée par un individu. Les auteurs rapportent que cette valeur devrait se situer aux environs de 30% afin d'assurer un développement optimal de la puissance [43, 73]. Cependant, comme aucune mesure de la force maximale n'a été effectuée sur les sujets de cette étude, il est impossible d'établir des comparaisons en ce sens.

Les résultats démontrent également une interaction significative ($p < 0.05$) en faveur du groupe D. Ce résultat était attendu puisque l'entraînement subi par les sujets de ce groupe était très spécifique aux tests de puissance.

2.3.2.2 – Sprints

Les résultats obtenus lors des tests de sprints sur 30m ne démontrent aucune amélioration significative, et ce pour les deux groupes, à la suite de la période de 8 semaines d'entraînement. On peut toutefois noter une tendance à l'amélioration pour le groupe P. En effet, le temps mis pour franchir les 30m est passé de 3.95 à 3.91 secondes alors que le gain n'a été que d'un centième de seconde pour le groupe D (3.91 à 3.90).

Ces données sont semblables à celles obtenues par Wilson[43]. Les sujets de cette étude devaient réaliser un protocole d'entraînement en pliométrie ou en efforts dynamiques à la même intensité que les coureurs de notre projet. Après 10 semaines d'entraînement à raison de deux séances hebdomadaires, les sujets des deux groupes n'ont démontré aucune amélioration significative au test de vitesse sur 30m. Des résultats similaires ont également été publiés ne concernant cette fois que l'entraînement en pliométrie [63, 74].

Cependant, Paavolainen[5] rapporte que la vitesse en sprint sur 20m a été significativement améliorée ($p < 0.05$) après un entraînement de 9 semaines pendant lesquelles les efforts dynamiques et la pliométrie étaient pratiqués conjointement. Les sujets de cette étude étaient des coureurs de cross-country de niveau élite ($VO_{2max} = 63.7 \pm 2.7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$). Ces deux méthodes semblent donc efficaces pour améliorer la vitesse en sprints seulement si elles sont appliquées simultanément dans le même traitement.

2.3.3.3 – Sauts en contre mouvement

Les données obtenues lors des tests de sauts en contre mouvement indiquent que les deux méthodes d'entraînement de la force ont engendré des améliorations significatives ($p < 0.01$) à la suite de la période d'entraînement. Malgré qu'il n'y ait pas de différence significative entre les groupes après l'entraînement, il est possible de noter un léger avantage pour le groupe P. Ceci se manifeste en examinant l'amplitude de l'effet qui est de 0.52 pour le groupe P et de 0.25 pour le groupe D.

Ces résultats sont en accord avec ce qui est présenté dans la littérature scientifique. L'étude de Wilson[43] décrite à la section 2.3.2.2 propose des données en ce sens. Les sujets ayant subi un entraînement en pliométrie ont amélioré significativement ($p < 0.05$) leur performance aux sauts en contre mouvement de la même façon que les sujets ayant été impliqués dans les efforts dynamiques. La méta analyse de Markovic[48] appuie ces

résultats et conclue que l'entraînement en pliométrie est efficace dans le but d'améliorer la performance lors de tests de sauts verticaux.

La différence non significative observée entre les groupes en faveur du groupe P peut être expliquée par le type de contraction effectuée par ces coureurs à l'entraînement. Lors des sauts en contre mouvement, une composante excentrique précède tout juste la phase concentrique afin de profiter de la composante élastique du muscle[48]. Les sujets de ce groupe ont certainement bénéficié des sauts en contre bas effectués à l'entraînement qui impliquent cette composante excentrique[48]. Il est par ailleurs intéressant de noter que les sujets du groupe D ont aussi amélioré la performance en sauts malgré que les efforts à l'entraînement ne comprenaient que la phase concentrique. Il semble que la puissance développée à l'entraînement ait été suffisante.

2.3.3.4 – Raideur

Les résultats obtenus lors de cette étude ne relèvent aucune différence significative à la suite de la période d'entraînement concernant la raideur musculotendineuse et ce pour toutes les fréquences mesurées. Cependant, une tendance à la baisse a été observée à 2hz et à intensité maximale pour le groupe P. Les amplitudes d'effets sont respectivement 0.32 et 0.29.

La littérature est partagée sur cette question. Alors que certains auteurs affirment que la raideur optimale doit être élevée [57-59], d'autres suggèrent plutôt qu'elle doit être faible (on parle alors de compliance) [54-56, 75]. Considérant les diminutions de la raideur mesurées pour le groupe P ainsi que les améliorations que ces sujets ont enregistrées en regard du CE, il semble facile de suggérer que la raideur optimale doit être faible. Cependant, aucune corrélation significative ne vient confirmer cette position. Le lien entre la raideur et le CE ne semble donc pas si évident et mérite certainement des recherches plus approfondies.

Un fait d'ordre méthodologique se dégage cependant lorsqu'on examine la littérature scientifique concernant la raideur et le CE. Les manipulations utilisées pour mesurer la raideur dans les études consultées [54-59] sont toutes différentes. Les variations peuvent se situer au niveau des sujets (animaux vs. humains), des membres étudiés (gauche, droit ou les deux), de la partie anatomique visée (quadriceps, triceps sural ou jambe complète) ou de la tâche à effectuer par le sujet (résistance à contrer, sauts à

effectuer). Bien qu'elles prétendent toutes à la validité ainsi qu'à la fiabilité, il est possible que certaines erreurs se produisent d'une méthodologie à l'autre. Afin de pouvoir comparer les études entre elles, les méthodes devront être uniformisées tout en considérant la tâche spécifique du coureur.

Dans le cadre de ce projet, l'approche de Dalleau a été choisie en raison de la validité et de la fiabilité démontrée[62] mais aussi en raison de sa grande efficacité d'utilisation sur le terrain.

2.4 – Conclusion et Applications pratiques

Les résultats de cette étude nous permettent de conclure sur les aspects suivants :

1. L'entraînement combiné de la force explosive et de l'endurance est efficace dans le but d'améliorer le coût énergétique et la performance de coureurs amateurs.
2. Comme aucun autre facteur de performance (VO_2max , indice d'endurance) n'a été modifié à la suite de l'entraînement, il semble que les améliorations du coût énergétique soient responsables des améliorations de la performance sur 3000m.
3. Il apparaît que la pliométrie soit plus avantageuse pour susciter des améliorations du coût énergétique lorsqu'on compare cette méthode aux efforts dynamiques. La principale différence se situe au niveau du type de contraction musculaire impliqué dans chacune des méthodes. Alors que les efforts dynamiques ne font appel qu'à la phase concentrique, la pliométrie permet de solliciter la capacité de restaurer l'énergie élastique produite lors de la phase excentrique.
4. Les coureurs ayant un coût énergétique plus élevé sont également ceux qui sont susceptibles de tirer les plus grands bénéfices de ce type d'entraînement. L'évaluation de ce facteur de performance apparaît donc comme étant primordiale dans le cadre d'une planification optimale de l'entraînement.
5. Les coureurs, en plus de profiter des gains concernant le coût énergétique, ont amélioré certaines qualités neuromusculaires. Les gains de performance en puissance maximale et lors des sauts en contre mouvement démontrent que les entraînements explosifs permettent d'améliorer la performance athlétique en général.
6. Malgré qu'il n'y ait aucune corrélation significative entre les variations du coût énergétique et les variations de performance aux tests neuromusculaires, il semble que des modifications de ces qualités (puissance, sauts, raideur musculotendineuse) soient importantes pour engendrer des améliorations du coût énergétique.

Bibliographie

1. Larsen, H.B., *Kenyan dominance in distance running*. Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol, 2003. **136**(1): p. 161-70.
2. Foster, C. and A. Lucia, *Running economy : the forgotten factor in elite performance*. Sports Med, 2007. **37**(4-5): p. 316-9.
3. di Prampero, P.E., et al., *The energetics of endurance running*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1986. **55**(3): p. 259-66.
4. Bulbulian, R., A.R. Wilcox, and B.L. Darabos, *Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes*. Med Sci Sports Exerc, 1986. **18**(1): p. 107-13.
5. Paavolainen, L., et al., *Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power*. J Appl Physiol, 1999. **86**(5): p. 1527-33.
6. Midgley, A.W., L.R. McNaughton, and M. Wilkinson, *Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners?: empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations*. Sports Med, 2006. **36**(2): p. 117-32.
7. Bassett, D.R., Jr. and E.T. Howley, *Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance*. Med Sci Sports Exerc, 2000. **32**(1): p. 70-84.
8. Hill, A.V. and H. Lupton, *Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen*. Quartely Journal of Medicine, 1923. **16**: p. 135-171.
9. Vandewalle, H., *[Oxygen uptake and maximal oxygen uptake: interests and limits of their measurements]*. Ann Readapt Med Phys, 2004. **47**(6): p. 243-57.
10. Midgley, A.W., et al., *Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research*. Sports Med, 2007. **37**(12): p. 1019-28.
11. Cunningham, D.A., D. McCrimmon, and L.F. Vlach, *Cardiovascular response to interval and continuous training in women*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1979. **41**(3): p. 187-97.
12. Docherty, D. and B. Sporer, *A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training*. Sports Med, 2000. **30**(6): p. 385-94.

13. Helgerud, J., et al., *Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training*. Med Sci Sports Exerc, 2007. **39**(4): p. 665-71.
14. Bosquet, L., L. Leger, and P. Legros, *Methods to determine aerobic endurance*. Sports Med, 2002. **32**(11): p. 675-700.
15. Bosquet, L., L. Leger, and P. Legros, *Methods of assessing of aerobic endurance*. Science & Sports, 2000. **15**(2): p. 55-73.
16. Jones, A.M. and H. Carter, *The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness*. Sports Med, 2000. **29**(6): p. 373-86.
17. Midgley, A.W., L.R. McNaughton, and A.M. Jones, *Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge?* Sports Med, 2007. **37**(10): p. 857-80.
18. Jung, A.P., *The impact of resistance training on distance running performance*. Sports Med, 2003. **33**(7): p. 539-52.
19. Péronnet, F., *Significations et limites de la lactacidémie dans le contrôle de l'entraînement*, in *Troisième Colloque International de la Guadeloupe*. 1994: Guadeloupe.
20. MacDougall, D. and D. Sale, *Continuous vs. interval training: a review for the athlete and the coach*. Can J Appl Sport Sci, 1981. **6**(2): p. 93-7.
21. Monod, H. and J. Scherer, *The work capacity of synergic muscle group*. Ergonomics, 1965. **8**: p. 329-338.
22. Smith, J.C., B.S. Dangelmaier, and D.W. Hill, *Critical power is related to cycling time trial performance*. Int J Sports Med, 1999. **20**(6): p. 374-8.
23. Busso, T. and M. Chatagnon, *Modelling of aerobic and anaerobic energy production in middle-distance running*. Eur J Appl Physiol, 2006. **97**(6): p. 745-54.
24. Coyle, E.F., *Physiological determinants of endurance exercise performance*. J Sci Med Sport, 1999. **2**(3): p. 181-9.
25. McArdle, W.D., F.I. Katch, and V.L. Katch, *Exercise physiology : energy, nutrition, and human performance*. 6th ed. 2007, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. lxxi, 1068, 41.
26. Jenkins, D.G. and B.M. Quigley, *Endurance training enhances critical power*. Med Sci Sports Exerc, 1992. **24**(11): p. 1283-9.

27. Saunders, P.U., et al., *Factors affecting running economy in trained distance runners*. Sports Med, 2004. **34**(7): p. 465-85.
28. Kram, R. and C.R. Taylor, *Energetics of running: a new perspective*. Nature, 1990. **346**(6281): p. 265-7.
29. Conley, D.L. and G.S. Krahenbuhl, *Running economy and distance running performance of highly trained athletes*. Med Sci Sports Exerc, 1980. **12**(5): p. 357-60.
30. Morgan, D.W., P.E. Martin, and G.S. Krahenbuhl, *Factors affecting running economy*. Sports Med, 1989. **7**(5): p. 310-30.
31. Xu, F. and E.C. Rhodes, *Oxygen uptake kinetics during exercise*. Sports Med, 1999. **27**(5): p. 313-27.
32. Morgan, D.W. and M. Craib, *Physiological aspects of running economy*. Med Sci Sports Exerc, 1992. **24**(4): p. 456-61.
33. Franch, J., et al., *Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands*. Med Sci Sports Exerc, 1998. **30**(8): p. 1250-6.
34. Helgerud, J., et al., *Aerobic endurance training improves soccer performance*. Med Sci Sports Exerc, 2001. **33**(11): p. 1925-31.
35. Millet, G.P., et al., *Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and $\dot{V}O_2$ kinetics*. Med Sci Sports Exerc, 2002. **34**(8): p. 1351-9.
36. Esteve-Lanao, J., et al., *How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance*. Med Sci Sports Exerc, 2005. **37**(3): p. 496-504.
37. Folland, J.P. and A.G. Williams, *The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength*. Sports Med, 2007. **37**(2): p. 145-68.
38. Osteras, H., J. Helgerud, and J. Hoff, *Maximal strength-training effects on force-velocity and force-power relationships explain increases in aerobic performance in humans*. Eur J Appl Physiol, 2002. **88**(3): p. 255-63.
39. Chilibeck, P.D., D.G. Syrotuik, and G.J. Bell, *The effect of strength training on estimates of mitochondrial density and distribution throughout muscle fibres*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1999. **80**(6): p. 604-9.
40. Gabriel, D.A., G. Kamen, and G. Frost, *Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices*. Sports Med, 2006. **36**(2): p. 133-49.

41. Kraemer, W.J. and N.A. Ratamess, *Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training*. Sports Med, 2005. **35**(4): p. 339-61.
42. Zafeiridis, A., et al., *Serum leptin responses after acute resistance exercise protocols*. J Appl Physiol, 2003. **94**(2): p. 591-7.
43. Wilson, G.J., et al., *The optimal training load for the development of dynamic athletic performance*. Med Sci Sports Exerc, 1993. **25**(11): p. 1279-86.
44. Smith, D.J., *A framework for understanding the training process leading to elite performance*. Sports Med, 2003. **33**(15): p. 1103-26.
45. Zatsiorsky, V.M. and W.J. Kraemer, *Science and practice of strength training*. 2nd ed. 2006, Champaign, IL: Human Kinetics. xii, 251.
46. Malisoux, L., et al., *Calcium sensitivity of human single muscle fibers following plyometric training*. Med Sci Sports Exerc, 2006. **38**(11): p. 1901-8.
47. Chu, D.A., *Jumping into plyometrics*. 2nd ed. 1998, Champaign, IL: Human Kinetics. v, 177.
48. Markovic, G., *Does plyometric training improve vertical jump height? A meta-analytical review*. Br J Sports Med, 2007. **41**(6): p. 349-55; discussion 355.
49. Kawamori, N. and G.G. Haff, *The optimal training load for the development of muscular power*. J Strength Cond Res, 2004. **18**(3): p. 675-84.
50. Baker, D.G. and R.U. Newton, *Change in power output across a high-repetition set of bench throws and jump squats in highly trained athletes*. J Strength Cond Res, 2007. **21**(4): p. 1007-11.
51. Winter, D.A., *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd ed. 2005, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. xvi, 325.
52. Blickhan, R., *The spring-mass model for running and hopping*. J Biomech, 1989. **22**(11-12): p. 1217-27.
53. Dalleau, G., A. Rahmani, and C. Verkindt, *Relationship between power and musculotendinous stiffness in high level athletes*. Science & Sports, 2007. **22**(2): p. 110-116.
54. Morgan, D.L., U. Proske, and D. Warren, *Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos*. J Physiol, 1978. **282**: p. 253-61.

55. Arampatzis, A., et al., *Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy*. J Exp Biol, 2006. **209**(Pt 17): p. 3345-57.
56. Lichtwark, G.A. and A.M. Wilson, *Is Achilles tendon compliance optimised for maximum muscle efficiency during locomotion?* J Biomech, 2007. **40**(8): p. 1768-75.
57. Spurrs, R.W., A.J. Murphy, and M.L. Watsford, *The effect of plyometric training on distance running performance*. Eur J Appl Physiol, 2003. **89**(1): p. 1-7.
58. Dalleau, G., et al., *The spring-mass model and the energy cost of treadmill running*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1998. **77**(3): p. 257-63.
59. Heise, G.D. and P.E. Martin, *"Leg spring" characteristics and the aerobic demand of running*. Med Sci Sports Exerc, 1998. **30**(5): p. 750-4.
60. Heise, G.D. and P.E. Martin, *Are variations in running economy in humans associated with ground reaction force characteristics?* Eur J Appl Physiol, 2001. **84**(5): p. 438-42.
61. Kyrolainen, H., A. Belli, and P.V. Komi, *Biomechanical factors affecting running economy*. Med Sci Sports Exerc, 2001. **33**(8): p. 1330-7.
62. Dalleau, G., et al., *A simple method for field measurements of leg stiffness in hopping*. Int J Sports Med, 2004. **25**(3): p. 170-6.
63. Lehanç, C., J.L. Croisier, and T. Bury, *Optojump system efficiency in the assessment of lower limbs explosive strength*. Science & Sports, 2005. **20**(3): p. 131-135.
64. Winter, E.M., R.G. Eston, and K.L. Lamb, *Statistical analyses in the physiology of exercise and kinanthropometry*. J Sports Sci, 2001. **19**(10): p. 761-75.
65. Cohen, J., *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. 1988, Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates. xxi, 567.
66. Saunders, P.U., et al., *Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners*. J Strength Cond Res, 2006. **20**(4): p. 947-54.
67. Johnston, R.E., et al., *Strength training in female distance runners: Impact on running economy*. Journal of Strength and Conditioning Research, 1997. **11**(4): p. 224-229.
68. Leveritt, M., et al., *Concurrent strength and endurance training. A review*. Sports Med, 1999. **28**(6): p. 413-27.
69. Hickson, R.C., *Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1980. **45**(2-3): p. 255-63.

70. Hoff, J., J. Helgerud, and U. Wisloff, *Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers*. Med Sci Sports Exerc, 1999. **31**(6): p. 870-7.
71. Ebben, W.P., et al., *The effect of high-load vs. high-repetition training on endurance performance*. J Strength Cond Res, 2004. **18**(3): p. 513-7.
72. Kraemer, W.J. and K. Häkkinen, *Strength training for sport*. Handbook of sports medicine and science. 2002, Oxford ; Malden, MA: Blackwell Science. x, 186.
73. Thomas, G.A., et al., *Maximal power at different percentages of one repetition maximum: influence of resistance and gender*. J Strength Cond Res, 2007. **21**(2): p. 336-42.
74. Markovic, G., et al., *Effects of sprint and plyometric training on muscle function and athletic performance*. J Strength Cond Res, 2007. **21**(2): p. 543-9.
75. Walshe, A.D. and G.J. Wilson, *The influence of musculotendinous stiffness on drop jump performance*. Can J Appl Physiol, 1997. **22**(2): p. 117-32.